



Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN
"SCIENZE DELL'INGEGNERIA"

CICLO XXIII

COORDINATORE Prof. Trillo Stefano

**Valutazione dell'accuratezza di DSMs estratti
da stereocoppie satellitari ad alta risoluzione
per territori a carattere fortemente
pianeggiante**

Settore Scientifico Disciplinare ICAR/06

Dottorando

Dott. Furini Alessio

(firma)

Tutore

Prof. Russo Paolo

(firma)

Anni 2008/2010

Sommario

Introduzione	1
1. Cenni di fotogrammetria	3
1.1. Introduzione.....	3
1.2. La fotogrammetria aerea e la restituzione stereoscopica.....	5
1.3. Il telerilevamento da satellite.....	7
2. Satelliti ad alta risoluzione	9
2.1. Introduzione.....	9
2.2. Caratteristiche orbitali dei satelliti	9
2.3. Caratteristiche dei sensori.....	12
3. Modelli altimetrici digitali.....	19
3.1. Introduzione.....	19
3.2. Tecniche di acquisizione del dato	20
3.2.1. <i>Impiego di cartografia esistente</i>	21
3.2.2. <i>Rilievo topografico</i>	21
3.2.3. <i>Fotogrammetria aerea</i>	21
3.2.4. <i>Fotogrammetria spaziale</i>	22
3.2.5. <i>Interferometria SAR</i>	22
3.2.6. <i>LiDAR</i>	22
3.3. La realizzazione del modello.....	23
3.3.1. <i>Il modello a griglia regolare</i>	25
3.3.2. <i>Modello TIN</i>	27
3.4. Prescrizioni tecniche e verifiche	28
3.5. I prodotti derivati.....	29
3.6. Le applicazioni dei DSM	30
4. Generazione di DSM da immagini satellitari ad alta risoluzione	33
4.1. Acquisizione del dato	33
4.2. Rilievo e caratteristiche dei Gound Points	33
4.3. Correzione geometrica.....	35
4.3.1. <i>Modelli rigorosi</i>	37
4.3.2. <i>Modello rigoroso per il satellite IKONOS II</i>	48
4.3.3. <i>Modelli razionali</i>	52
4.3.4. <i>Valutazione dell'accuratezza</i>	56
4.4. Correzione radiometrica	59
4.5. Estrazione del modello	60
4.5.1. <i>Image enhancement</i>	66
4.5.2. <i>Pan-sharpening</i>	67
4.6. Validazione del modello estratto.....	68
5. Prove di estrazione da stereocoppia IKONOS II.....	73
5.1. Caratteristiche della stereocoppia.....	73
5.2. Le elaborazioni del 2005.....	76
5.3. Le elaborazioni del 2009.....	77

5.4. Rilievo ed elaborazione dei GPs.....	79
5.5. Riconoscimento dei TPs.....	80
5.6. Orientamento con GCPs.....	81
5.6.1. <i>Orientamento con modello rigoroso</i>	82
5.6.2. <i>Orientamento con RFM: SISAR</i>	84
5.6.3. <i>Generazione degli RPC con SISAR</i>	85
5.6.4. <i>Considerazioni conclusive</i>	85
5.7. Orientamento con GCPs e TPs.....	86
5.7.1. <i>Orientamento con modello polinomiale: ENVI 4.6.1</i>	86
5.7.2. <i>Orientamento con modello rigoroso</i>	87
5.7.3. <i>Orientamento con modello razionale</i>	87
5.8. Orientamento delle immagini multispettrali.....	87
5.9. Estrazione dei DSMs.....	88
5.9.1. <i>DSMs estratti con ENVI 4.6.1</i>	88
5.9.2. <i>DSMs estratti con OrthoEngine v.10.2</i>	88
5.9.3. <i>DSMs estratti con SISAR</i>	95
5.9.4. <i>DSMs estratti con DPCOR</i>	97
5.10. Validazione dei DSMs.....	102
5.10.1. <i>Confronti con punti di controllo</i>	102
5.10.2. <i>Confronti con DSM di riferimento</i>	106
5.10.2.1. <i>DSM AGEA</i>	106
5.10.2.2. <i>Confronti eseguiti</i>	107
5.10.2.3. <i>Considerazioni conclusive</i>	111
5.10.3. <i>Confronti tra DSM</i>	115
5.10.4. <i>Estrazione di profili</i>	116
6. Prove di estrazione da stereocoppia GeoEye-1.....	119
6.1. Caratteristiche della stereocoppia.....	119
6.2. Rilievo ed elaborazione dei GPs.....	123
6.3. Orientamento con GCPs.....	125
6.3.1. <i>Orientamento con modello rigoroso: OrthoEngine v.10.3</i>	127
6.3.2. <i>Orientamento con modello rigoroso: SISAR</i>	131
6.3.3. <i>Orientamento con RFM: SISAR</i>	134
6.3.4. <i>Generazione degli RPC con SISAR</i>	136
6.3.5. <i>Considerazioni conclusive</i>	136
6.4. Orientamento con GCPs e TPs.....	137
6.4.1. <i>Orientamento con modello rigoroso: OrthoEngine v.10.3</i>	138
6.4.2. <i>Orientamento con modello rigoroso: SISAR</i>	141
6.5. Estrazione dei DSMs.....	143
6.5.1. <i>DSMs estratti con OrthoEngine v.10.3</i>	143
6.5.2. <i>DSMs estratti con SISAR</i>	150
6.6. Validazione dei DSMs.....	154
6.6.1. <i>Confronti con punti di controllo</i>	154
6.6.2. <i>Confronti con DSM di riferimento</i>	160
6.6.3. <i>Livello di precisione dei modelli estratti</i>	170
6.6.4. <i>Confronti tra DSM</i>	170
6.6.5. <i>Estrazione di profili</i>	174
6.7. Impiego dei DSM estratti in campo idraulico.....	176
6.7.1. <i>Rilievo ed elaborazione dei dati</i>	177
6.7.2. <i>Implementazione del modello</i>	178
6.7.3. <i>Definizione dell'evento critico</i>	180

6.7.4. <i>Simulazione e validazione</i>	180
6.7.5. <i>Impiego di dati satellitari</i>	181
Conclusioni	183
Ringraziamenti	187
Bibliografia	189
Appendici	195
Appendice I Caratteristiche dei satelliti impiegati.....	195
A.I.1 <i>IKONOS II</i>	195
A.I.2 <i>GeoEye-1</i>	203
Appendice II Specifiche tecniche per modelli altimetrici da impiegare nella modellazione idraulica.....	205
Appendice III Stereocoppia IKONOS II dell'area di Ferrara.....	207
A.III.1 <i>Coordinate dei GPs</i>	207
A.III.2 <i>Coordinate dei TPs</i>	208
A.III.3 <i>Distribuzioni dei GCPs usati per l'orientamento</i>	210
A.III.4 <i>Test di orientamento</i>	211
Appendice IV Stereocoppia GeoEye-1 dell'area di Argenta.....	214
A.IV.1 <i>Coordinate dei GPs</i>	214
A.IV.2 <i>Distribuzioni dei GCPs usati per l'orientamento</i>	216
A.IV.3 <i>Test di orientamento</i>	217

Introduzione

La conoscenza della morfologia del territorio e dei suoi mutamenti rappresenta un'informazione imprescindibile in molti settori applicativi, quali la progettazione di infrastrutture ed opere ingegneristiche o la pianificazione territoriale. Fino ad alcuni anni fa, questo era possibile grazie all'ausilio della sola cartografia, con informazioni aggiuntive relative alla quota sotto forma di curve di livello o piani quotati. Grazie allo sviluppo tecnologico, dapprima sono state messe a disposizione dei progettisti le cartografie numeriche, poi modelli digitali tridimensionali del terreno o della superficie. Questi ultimi si devono all'elevata qualità raggiunta nell'acquisizione di informazioni 3D mediante tecniche quali LiDAR, inSAR, GNSS, fotogrammetria e telerilevamento, ovviamente con rilevanti differenze in termini di precisione, costi e tempi di realizzazione.

Tra le metodologie descritte, sempre più importanza sta assumendo in tutte le applicazioni cartografiche proprio l'impiego di immagini satellitari, in grado di apportare vantaggi inerenti principalmente alla rapidità di acquisizione, elaborazione del dato anche per vaste aree e contenimento complessivo dei costi. Ciò è reso possibile grazie ai satelliti per uso commerciale ad alta risoluzione (il primo dei quali fu IKONOS II, lanciato in orbita nel 1999), che garantiscono dimensioni del pixel a terra inferiori al metro, tempi di rivisitazione della medesima area di pochi giorni e possibilità di acquisizione di immagini stereoscopiche elaborabili con i principi fotogrammetrici classici.

L'effettivo impiego di dati di origine satellitare è però strettamente legato a fattori quali le finalità prefissate (qualità del prodotto finale), le caratteristiche del sensore (risoluzione spaziale e radiometrica), i prodotti acquistabili, i programmi impiegati per il loro trattamento. Le immagini devono inoltre essere orientate e corrette sia dal punto di vista geometrico che da quello radiometrico, in modo da eliminare problemi legati al processo di acquisizione stessa dell'immagine e dipendenti dal sistema di acquisizione (caratteristiche ottico-geometriche e dell'orbita, assetto al momento della presa, posizione rispetto alla Terra) e dall'atmosfera terrestre. Ciò è reso possibile dall'impiego di due tipi di modelli: i metodi rigorosi, o fisici, legati al processo fisico di acquisizione dell'immagine da parte di ciascun satellite e basati sulle equazioni di collinearità, ed i metodi polinomiali e razionali, basati su approcci generalizzati che legano coordinate immagine e terreno ed esulano dalle caratteristiche del sensore impiegato.

Per quanto riguarda poi l'estrazione delle informazioni relative alla quota, si ricorre a procedure automatiche di riconoscimento di elementi omologhi nelle due immagini; il

parametro di ricerca può essere costituito dai valori di radianza contenuti in ciascun pixel immagine o da primitive geometriche semplici. Solo al termine di tale processo è possibile calcolare le coordinate tridimensionali sulla base dei dati dell'orientamento ed estrarre un modello a griglia regolare da impiegare come dato di partenza nei diversi campi applicativi.

In questa tesi è stato pertanto analizzato l'intero processo di orientamento delle immagini ed estrazione del modello impiegando software commerciale e scientifico, al fine di ottimizzare risorse umane e tempi di elaborazione per l'estrazione di un modello di elevata precisione. Lo studio descritto è stato svolto mediante l'impiego di due stereocoppie satellitari ad alta risoluzione, una acquisita con il satellite IKONOS II (risoluzione delle immagini pancromatiche di 1m) sull'area di Ferrara nel 2004, l'altra relativa all'area di Argenta ed acquisita nel 2010 dal satellite GeoEye-1 (risoluzione delle immagini pancromatiche di 0.5m). In entrambi i casi le elaborazioni sono state condotte sia impiegando la banda pancromatica (tipicamente l'unica impiegata in questo tipo di elaborazione) che quelle multispettrali (al contrario impiegate quasi esclusivamente per la realizzazione di mappe tematiche). Tutti i diversi modelli generati sono stati poi confrontati e validati sulla base di un set di dati di riferimento.

Nella prima parte dell'elaborato sono riportati gli aspetti teorici: sono descritte le peculiarità della fotogrammetria e del telerilevamento da satellite (Capitolo 1) e delle piattaforme in orbita (Capitolo 2), inoltre si ha la trattazione sui Modelli Digitali del Terreno (Capitolo 3), con particolare attenzione al processo basato sull'impiego di dati satellitari (Capitolo 4). Nella seconda parte sono descritte le procedure ed i risultati ottenuti per i due set di dati a disposizione, la stereocoppia IKONOS II (Capitolo 5) e quella GeoEye-1 (Capitolo 6).

1. Cenni di fotogrammetria

1.1. Introduzione

La fotogrammetria è una tecnica di rilevamento finalizzata a determinare la posizione nello spazio di tutti i punti che occorrono per ricostruire forma, dimensioni e posizione di un oggetto, al fine di realizzare un modello geometrico tridimensionale sufficientemente approssimato per gli scopi prefissati. In particolare, a differenza dei classici rilievi topografici, le informazioni necessarie sono ottenute mediante l'impiego simultaneo di più fotogrammi che ritraggono l'oggetto di interesse da diverse posizioni.

Fin da quando nacque ufficialmente nel 1876, essa fu impiegata per la produzione e l'aggiornamento di cartografia, seppure il suo impiego fu in parte ostacolato principalmente dall'elevata distorsione degli obiettivi impiegati. Con lo sviluppo della tecnologia sugli aeroplani e la necessità di cartografia aggiornata durante la Prima Guerra Mondiale, essa divenne per oltre mezzo secolo l'unica tecnica impiegata per la produzione di mappe; sistemi opto-meccanici di elevata precisione ed altrettanto sofisticati apparecchi per l'estrazione del dato geometrico rendevano poco flessibile e soprattutto molto costosa la fotogrammetria analogica, per cui la sua diffusione fu limitata solo al settore bellico. Con l'elevato sviluppo dei calcolatori elettronici, al contrario, negli ultimi decenni si è assistito ad una rapida evoluzione delle tecnologie impiegabili, con lo scopo principale di ridurre i costi e di velocizzare le procedure. A partire dagli anni Settanta è iniziata l'epoca della fotogrammetria analitica: le camere impiegate divennero non necessariamente metriche, in quanto tutti i discostamenti dal comportamento ideale erano corretti a posteriori per via computazionale. Infine, dagli anni Novanta si è passati alla fotogrammetria digitale (soft-copy photogrammetry), mutando notevolmente l'approccio alla tecnica: non sono più necessari particolari apparecchiature e supporti per le immagini, ma si opera su matrici numeriche e tutto è informatizzato e facilmente archiviabile e trasferibile. Si sfrutta infatti un sensore (CCD o CMOS) in grado di realizzare una griglia di campionamento solidale con l'ottica sulla quale l'informazione del flusso energetico viene rapidamente registrata; l'ulteriore sviluppo anche degli strumenti di calcolo e di elaborazione permette poi ora l'estrazione automatica di dati tridimensionali partendo da coppie di immagini.

Si deve dunque ai costi inferiori ed alla maggior facilità d'utilizzo dovuti agli sviluppi tecnologici, informatici, di gestione di grosse moli di dati e nella computer grafica il maggior ricorso alle tecniche fotogrammetriche anche in nuovi settori, quali ambiente, geologia, ingegneria,... Essa è ormai diventata una tecnica tra le più affidabili nell'acquisizione di dati metrici e tematici per la determinazione della posizione spaziale di oggetti, nel monitoraggio e nella conservazione di beni architettonici e naturali. Il fatto che i risultati ottenibili siano sotto forma di numeri, disegni ed immagini rende possibile il suo impiego, tra gli altri, nelle seguenti applicazioni:

- topografia: produzione ed aggiornamento di carte topografiche, realizzazione di ortofoto e DTM, creazione di reti di riferimento per successivi rilievi topografici, monitoraggio di fenomeni dinamici;
 - architettura ed Ingegneria civile: rilievo di edifici antichi e moderni, documentazione di edifici, controllo di lesioni, rilievi di interni o particolari architettonici, controllo delle deformazioni, ...;
 - conservazione dei monumenti: archiviazione fotografica dei beni, utile in caso di restauri;
 - archeologia: documentazione e rilievo degli scavi, controllo di deformazioni;
 - bio-fotogrammetria: determinazione della morfologia di esseri umani;
 - fotogrammetria legale: ricostruzione metrica degli incidenti stradali o di scene criminali;
 - fotogrammetria industriale: controllo di prototipi, della movimentazione di apparecchi automatici e robot;
- ...

Di contro bisogna comunque sottolineare che la progettazione dei software è divenuta sempre più impegnativa e basata su tecniche statistiche sofisticate, senza però eliminare i rischi che un utente inesperto possa utilizzare in maniera errata tale tecnica.

Oggi si è soliti identificare il tipo di fotogrammetria in funzione della distanza tra la camera e l'oggetto del rilievo, definendo:

- fotogrammetria dei vicini / terrestre / architettonica: realizzata con immagini da terra, è utile per rilevare fabbricati, opere d'arte, monumenti, reperti archeologici, componenti meccanici, ...;
- aerofotogrammetria: realizzata con immagini acquisite da fotocamere montate su aeromobile, è impiegata per la realizzazione e l'aggiornamento di cartografia;
- fotogrammetria spaziale / telerilevamento: realizzata con sensore montato su satellite, utile per generare mappe tematiche e cartografia fino a scala media (1:25000-1:10000) e grande (1:5000).

Indipendentemente dalla tipologia adottata, un rilievo fotogrammetrico si articola nelle seguenti fasi:

- presa: acquisizione delle immagini fotografiche;
- rilevamento d'appoggio: mediante tecniche topografiche si determina la posizione nello spazio di particolari punti, utili per il successivo orientamento dei fotogrammi;
- orientamento: nella fotogrammetria classica si basa sulla misura diretta di coordinate immagine sui fotogrammi, mentre nella fotogrammetria digitale parte dal riconoscimento sull'immagine dei particolari e dalla determinazione del relativo pixel nella matrice. In ambedue permette la deduzione, per via analitica, della posizione e dell'assetto della camera all'atto della presa;
- restituzione: elaborate le immagini, integrandole con i dati del rilievo d'appoggio si ottiene il modello finale reale (ad es. plastico, mappa) o virtuale (modello wireframe o solido ottenuto mediante opportuni software).

1.2. La fotogrammetria aerea e la restituzione stereoscopica

Come detto, nel caso della fotogrammetria aerea oggetto del rilievo è il terreno ed i risultati delle elaborazioni permettono sia di formare il modello dell'area indagata ricostruendone forma e dimensioni che di realizzare una rappresentazione cartografica tramite una proiezione ortogonale del modello stesso.

Ogni immagine acquisita può essere infatti considerata una proiezione centrale dell'oggetto ripreso, in quanto tutti i raggi necessari per descrivere il terreno passano per il medesimo punto, coincidente con il centro dell'obiettivo. Una semplice proiezione fatta da tale centro di presa sul piano tangente alla sfera locale passante per il centro dell'area inquadrata genererebbe un'immagine deformata, non utilizzabile a fini cartografici.

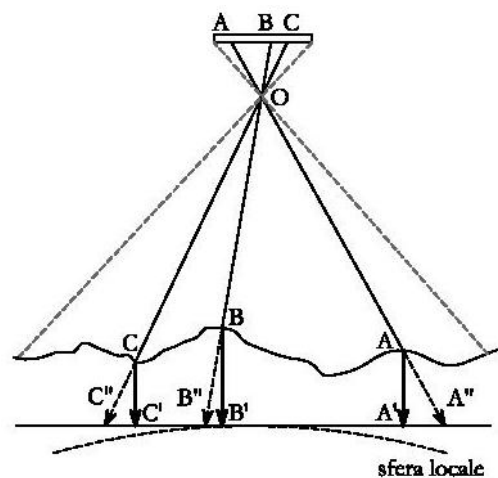


Figura 1-1 - Proiezione di punti terreno sul piano tangente alla sfera locale

Partendo da tale base, la fotogrammetria aerea permette quindi la ricostruzione del terreno mediante l'impiego di due fotogrammi della stessa zona acquisiti da punti differenti dello spazio. Ogni punto sulla superficie terrestre riconoscibile in entrambi i fotogrammi è definito PUNTO OMOLOGO ed i raggi che collegano il punto appartenente alla superficie terrestre ai relativi punti immagine vengono chiamati RAGGI OMOLOGHI. Nota dunque la posizione di presa di ciascun fotogramma, la ricostruzione tridimensionale del terreno avviene con la RESTITUZIONE STEREOSCOPICA, riconoscendo cioè tutti i punti omologhi sulla coppia di immagini ed intersecando i corrispondenti raggi omologhi. La trasformazione finale di ogni punto in coordinate cartografiche e quota ortometrica consente di ottenere la rappresentazione cartografica finale.

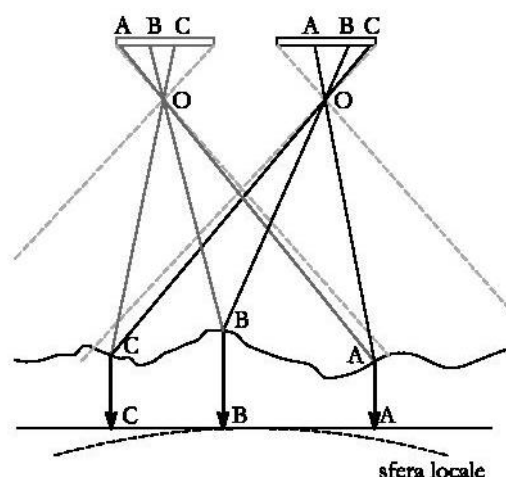


Figura 1-2 - Restituzione stereoscopica

Per la restituzione di vaste porzioni di territorio, grande importanza assume quindi la progettazione del volo: viaggiando ad una quota costante H , durante ciascuna strisciata vengono acquisiti fotogrammi in maniera tale che tra due immagini vi sia almeno il 60% di sovrapposizione. Per legare i fotogrammi di ciascuna strisciata, l'interasse tra le strisciate adiacenti deve essere tale da garantire una ricopertura trasversale pari ad almeno il 20% del fotogramma.

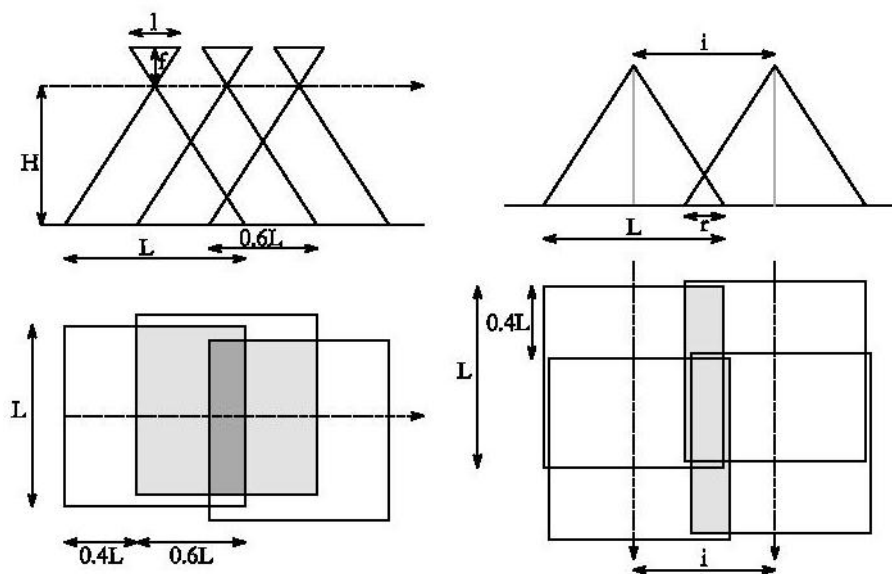


Figura 1-3 - Sovrapposizione fra strisciate adiacenti

Per quanto riguarda le altre fasi del processo elencate nel paragrafo precedente, il rilievo dei punti d'appoggio non sempre è necessario, in quanto in passato si utilizzava la tecnica della triangolazione aerea per orientare i fotogrammi, mentre attualmente le camere da presa sono equipaggiate con sensori GPS ed INS che permettono l'orientamento diretto delle immagini. La restituzione, inoltre, se fatta impiegando un restitutore in grado anche di effettuare l'orientamento dei fotogrammi note alcune coordinate di base, avviene in maniera semiautomatica, in quanto l'intervento dell'operatore si ha solitamente per raffinare la collimazione dei punti omologhi.

Il principale svantaggio di tale tecnica è costituito dai tempi di realizzazione del prodotto finale, in quanto per nuova cartografia di vaste aree possono essere necessari anche alcuni anni.

1.3. Il telerilevamento da satellite

La prima piattaforma satellitare per telerilevamento fu il Landsat 1, lanciato in orbita nel 1972: lo scarso dettaglio delle immagini e la loro ridotta fedeltà geometrica le rendevano utilizzabili esclusivamente per la realizzazione di mappe tematiche a piccola scala, cioè studi basati sull'identificazione di aree con copertura simile derivante dall'analisi della risposta spettrale dei suoli stessi. Solo con la messa in orbita nell'ultimo decennio di satelliti a risoluzione maggiore, a partire dai cosiddetti satelliti di seconda generazione (IKONOS II, QuickBird, SPOT 5, OrbView, EROS A), il contenuto geometrico delle immagini acquisite è divenuto sufficientemente affidabile per poterle utilizzare anche a fini cartografici.

Rispetto alla fotogrammetria aerea, dunque, i vantaggi principali del telerilevamento sono riassumibili in:

- monitoraggio di vaste aree;
- possibilità di studiare aree lontane o difficilmente accessibili;
- ripetibilità anche in tempi brevi di osservazioni su una stessa porzione di territorio;
- stabilità della ripresa;
- dati originali sempre in formato digitale;
- possibilità di dati anche multispettrali.

Di contro, i principali svantaggi sono inerenti a:

- costi per unità di area elevati nel caso di satelliti ad alta risoluzione (dimensioni del pixel a terra inferiori ad 1m);
- ridotta flessibilità in relazione alle condizioni climatiche (copertura nuvolosa, foschia, neve) e di illuminazione.

Oltre quindi alle applicazioni tradizionali relative alla creazione di mappe tematiche ed all'aggiornamento di cartografia fino alla grande scala (1:5000), la maggiore disponibilità di immagini di buona risoluzione ha fatto sì che il telerilevamento sia ora abitualmente impiegato in applicazioni quali:

- creazione di mappe di uso del suolo e delle condizioni del suolo, delle acque e della vegetazione (agraria e forestale);
- creazione di mappe per il controllo dell'evoluzione temporale dell'occupazione del suolo;
- gestione delle emergenze derivanti da calamità naturali (frane, esondazioni, incendi, inquinamento dell'aria, ...);
- censimenti di infrastrutture urbane;
- pianificazione territoriale e studi di fattibilità e di impatto ambientale di nuove opere;

- simulazione di modelli per la prevenzione e la gestione delle emergenze nel caso di calamità naturali.

Ovviamente, un aspetto impossibile da risolvere consiste nella dipendenza dal periodo di rivisitazione e dalle condizioni meteorologiche: applicazioni nell'ambito del monitoraggio sono dunque da mettere in relazione a tali fattori, per cui anche a fronte di elaborazioni automatizzate e rapide, la possibilità di disporre di modelli aggiornati in caso ad esempio di gestione delle emergenze dipende dall'effettiva disponibilità di immagini da elaborare.

2. Satelliti ad alta risoluzione

2.1. *Introduzione*

Obiettivo principale di ciascuna missione satellitare è l'acquisizione di immagini di buona qualità per il periodo più lungo possibile. Per raggiungere tale scopo, nella fase di progettazione i parametri che devono pertanto essere tenuti in considerazione sono relativi sia alle caratteristiche dell'orbita che alla tipologia di sensore installato a bordo.

2.2. *Caratteristiche orbitali dei satelliti*

I satelliti per il telerilevamento seguono orbite libere attorno alla Terra, con moto governato principalmente dal campo di gravità. Esse devono essere tali da consentire l'acquisizione di immagini nella parte di pianeta illuminata dal Sole in posizione il più possibile prossima proprio alla congiungente Terra-Sole e far sì che il satellite inquadri la porzione più grande possibile della superficie terrestre per un numero limitato di ripetizioni.

Tali orbite sono del tipo denominato Low Earth Orbit (LEO), ovvero con un'altezza nominale compresa tra 300 e 1000Km, in quanto:

- a quote inferiori si avrebbero sollecitazioni eccessive dovute ad attrito nell'atmosfera che ridurrebbero la vita utile del satellite;
- a quote superiori si avrebbero interferenze radioattive in grado di compromettere il corretto funzionamento degli apparecchi di bordo.

Primo parametro fondamentale da considerare è l'inclinazione, ovvero l'angolo compreso tra il piano equatoriale e quello dell'orbita; le due distinzioni principali sono:

- orbite geostazionarie: hanno inclinazione pari a 0° , ed il satellite, posizionato sul piano equatoriale, percorre un'orbita quasi circolare. Un satellite in tale orbita viaggia con velocità angolare pari a quella terrestre ed ha quindi il suo stesso periodo di rotazione. Per ottenere tale condizione il satellite deve trovarsi ad una quota di circa 36000Km dalla superficie terrestre (è il caso dei satelliti per telecomunicazioni);

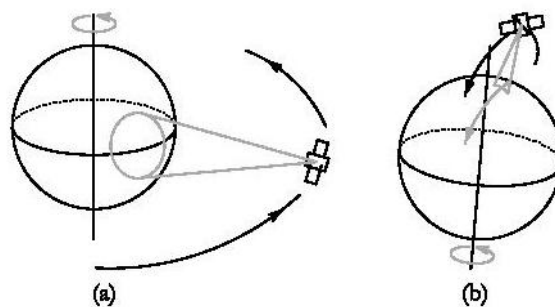


Figura 2-1 - Orbita geostazionaria (a), orbita pseudo-polare (b)

- orbite pseudo-polari: hanno inclinazione di quasi 90° ed il satellite compie una rivoluzione completa in circa 90 minuti percorrendo un'orbita ellittica, divisa in parte ascendente e parte discendente, la prima quella in cui il satellite viaggia verso Nord in un lato della Terra, l'altra in cui viaggia verso Sud sul lato opposto del globo. Tale orbita permette di coprire tutta la superficie in tempi ridotti in quanto percorrendo orbite di tipo LEO i satelliti hanno velocità elevate per resistere alla forza di attrazione terrestre (è il caso dei satelliti per acquisizione di immagini).

Sulla base di queste prime considerazioni è possibile identificare l'orbita ottimale tra quelle a disposizione studiando il problema basandosi sulle leggi che governano il moto del satellite soggetto ad un campo di gravità e che dunque coincidono con buona approssimazione con le tre leggi di Keplero valide per un corpo sferico ed omogeneo:

- l'orbita di un pianeta giace su un'ellissi piana avente il Sole in uno dei due fuochi;
- il segmento congiungente il Sole con un pianeta descrive aree uguali in tempi uguali;
- per ciascuna orbita il cubo del semiasse maggiore è proporzionale al quadrato del periodo di rivoluzione.

L'orbita ottimale sarebbe quella circolare in modo da avere un satellite in moto a distanza costante dalla Terra e dunque dimensioni del pixel al suolo costanti. Proprio per questo le orbite sono pressoché circolari con centro di massa terrestre nel loro centro geometrico e velocità di moto quasi omogenea nel tempo (in accordo con la seconda legge).

La definizione del periodo di rivoluzione è l'aspetto principale in fase di progettazione dell'orbita, nella cui determinazione oltre alla terza legge va considerato anche il rigonfiamento equatoriale della Terra, che comporta una rotazione uniforme del piano orbitale satellitare attorno all'asse di rotazione terrestre. La velocità angolare di tale rotazione dipende dall'inclinazione dell'orbita ed è pari a $\Omega' = d\Omega/dt$ con Ω indicante l'ascensione retta del nodo ascendente (posizione dell'orbita sul piano equatoriale, §4.3.1). Dopo un periodo di rivoluzione T si ha quindi una rotazione $\Delta\Omega = \Omega'T$. Il rigonfiamento equatoriale influisce anche sul periodo di rivoluzione poiché tiene conto dell'eccentricità dell'ellissi orbitale dovuta a piccole deviazioni rispetto ad una circonferenza.

Dalle equazioni che indicano velocità angolare di rotazione e periodo di rivoluzione il progetto dell'orbita si basa sulle equazioni:

$$\Omega = -2.012988 \cdot 10^{-6} \left(\frac{R}{R+h} \right)^{7/2} \cos i \quad \text{e} \quad T \approx 5969.18 \left(\frac{R}{R+h} \right)^{3/2}$$

dove:

- R: raggio equatoriale terrestre;
- h: altezza di volo del satellite rispetto all'equatore;
- i: inclinazione dell'orbita.

In aggiunta, per consentire una migliore illuminazione della scena ripresa e condizioni il più possibile omogenee ad ogni passaggio del satellite nella medesima porzione, l'angolo tra la direzione Terra-Sole ed il piano dell'orbita si deve mantenere costante (il piano orbitale satellitare deve ruotare

quindi rispetto allo spazio inerziale con la medesima velocità angolare con cui ruota quello solare): un satellite con tale proprietà è definito ELIOSINCRONO e si ha quindi $\Omega' = \Omega'_s = 1.991 \cdot 10^{-7} [s^{-1}]$ (con Ω'_s velocità angolare solare). Riferendosi ad orbite quasi polari, solitamente il passaggio ascendente è compiuto nella metà della Terra in ombra, mentre quello discendente è al contrario eseguito sul lato illuminato dal Sole, in modo da sorvolare ogni zona verso metà della mattina (nell'intervallo 9:30-11:30 ora locale).

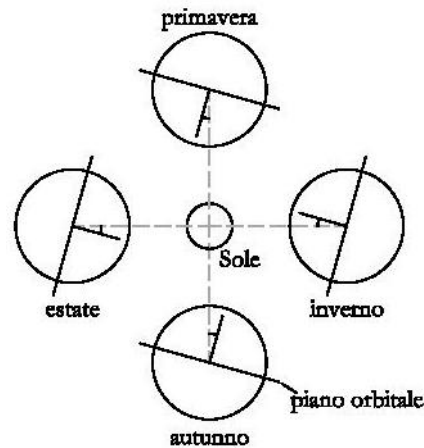


Figura 2-2 - Orbita eliosincrona

Determinata l'altezza di volo h si ricava dunque l'inclinazione:

$$\cos i = -\frac{0.199102118}{2.012988} \left(\frac{R}{R+h} \right)^{2/7}$$

A sua volta, però, h è legata al ciclo di ripetizione, vale a dire al numero di giorni k_d impiegati per ripassare sullo zenit dello stesso punto della Terra. Considerato che il periodo T_d della Terra è di circa un giorno, la durata del ciclo di ripetizioni è $k_d T_d$, cui è collegato il numero intero di rivoluzioni del satellite k_r . Essendo però $k_r T$ ancora una volta la durata del ciclo di ripetizione, dall'uguaglianza $k_d T_d = k_r T$ si ricava h :

$$h \approx \left(\frac{5969.18}{T} \right)^{2/3} R - R$$

La scelta di k_d e k_r deve essere dunque tale da garantire una quota di volo ed un'inclinazione accettabili, anche in funzione del fatto che legata all'inclinazione dell'orbita si ha pure l'estensione della zona del pianeta che può essere sorvolata: la fascia è infatti compresa tra valori di latitudine Nord e Sud pari proprio all'angolo di inclinazione.

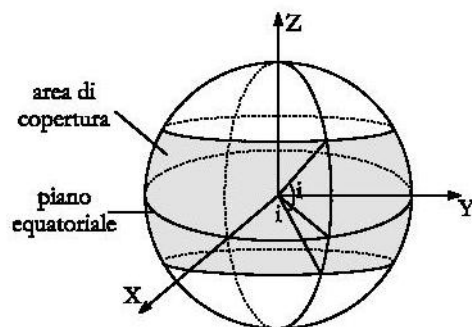


Figura 2-3 - Area di copertura di un satellite con angolo di inclinazione i

In realtà, tale valore di copertura è dipendente anche dal tipo di strumentazione installata: se infatti non si ha un sistema di registrazione dei dati a bordo, che devono quindi essere inviati direttamente alle stazioni riceventi, la copertura effettiva della piattaforma è data proprio dalla copertura delle stazioni a terra, ognuna delle quali è dipendente dalla linea di vista tra antenna e satellite, legata sia all'altezza dell'orbita che a parametri tecnici quali la minima elevazione dell'antenna rispetto all'orizzonte locale, il massimo angolo di off-nadir o la comunicazione tra satellite e stazione.

Come detto, per consentire inoltre una migliore illuminazione della scena ripresa ed un valore il più possibile costante ad ogni passaggio del satellite nella medesima porzione, la maggior parte dei satelliti con orbita pseudo-polare è anche eliosincrona, vale a dire che l'angolo tra la direzione Terra-Sole ed il piano dell'orbita si mantiene costante. In particolare, le migliori condizioni di illuminazione della superficie terrestre si hanno quando il Sun-angle, l'angolo compreso tra la normale locale e la direzione dei raggi del Sole, è minimo, ovvero quando il Sole è prossimo allo zenit; in realtà, per una miglior distinzione ed interpretazione dei dettagli il Sun-angle dovrebbe essere compreso tra i 20-40° (anche se i satelliti più recenti sono in grado di acquisire buone immagini anche con valori che si spingono fino a 60-80°).

2.3. Caratteristiche dei sensori

I sensori installati su satelliti per l'acquisizione di immagini sono di tipo passivo, vale a dire in grado di immagazzinare l'energia solare riflessa dalla superficie terrestre. Essi si distinguono in base alla tipologia e qualità di informazioni registrabili ed al tipo di sistema di acquisizione del dato.

Le **caratteristiche principali** che differenziano i diversi sensori in orbita sono dunque:

La **RISOLUZIONE SPAZIALE**, che indica l'area della superficie terrestre corrispondente alla dimensione di ciascun pixel dell'immagine finale, vale a dire la dimensione del più piccolo particolare individuabile (chiamata anche GSD, Ground Sampling Distance). Ogni pixel contiene infatti un unico valore uniforme su tutta la propria area, funzione della quantità di energia che lo ha colpito. Tale grandezza è inoltre collegata al valore dell'angolo, misurato dal centro dell'obiettivo e corrispondente ad un pixel, definito IFOV (Instantaneous Field Of View), funzione della quota di volo, della dimensione del singolo elemento dell'array e della focale del sistema ottico impiegato. La somma di

tutti i singoli angoli definisce l'angolo di vista FOV (Field Of View) del sensore, mentre si identifica con larghezza della traccia a terra rilevabile (swath) la porzione di superficie rilevata da ogni singola strisciata.

Una classificazione della risoluzione spaziale dei satelliti in orbita è data dalla seguente tabella.

Risoluzione spaziale [m]	Classe
<1	altissima
1÷5	alta
5÷20	media
20÷50	bassa
>50	bassissima

Tabella 2-1 - Classi di risoluzione spaziale

La RISOLUZIONE RADIOMETRICA, che rappresenta la capacità del sensore di rilevare differenze di energia elettromagnetica sulla scena. Ciascun elemento del CCD acquisisce un flusso continuo di energia che viene discretizzato in un segnale elettrico digitale che associa ad un numero binario un livello, o tono, di grigio (per i sensori pancromatici) o di colore (per i sensori multispettrali). La risoluzione identifica dunque il numero complessivo di livelli a disposizione, ed è sempre espressa in potenze di 2 (con valori che normalmente sono pari a 2^{11} bit, ovvero 2048 livelli).

La RISOLUZIONE SPETTRALE, che corrisponde all'ampiezza della banda dello spettro elettromagnetico che il sensore è in grado di discriminare. Si distinguono tre tipologie di sensori:

- pancromatici: forniscono un segnale corrispondente all'intervallo del visibile e dell'infrarosso vicino, resi in toni di grigio sull'immagine, impiegata per individuare la geometria dei particolari topografici di interesse;
- multispettrali: distinguono diverse bande all'interno dello spettro elettromagnetico di ampiezza variabile in funzione del grado di discriminazione richiesto, con risoluzione spaziale pari ad un quarto di quella pancromatica (di solito si hanno le bande R, G, B e NIR).
- iperspettrali: il numero delle bande aumenta in maniera considerevole, adattando i singoli intervalli dello spettro in modo da identificare accuratamente le firme delle differenti tipologie di copertura del suolo, con conseguente miglioramento nella discriminazione delle classi tematiche (di solito si hanno almeno 10 bande).

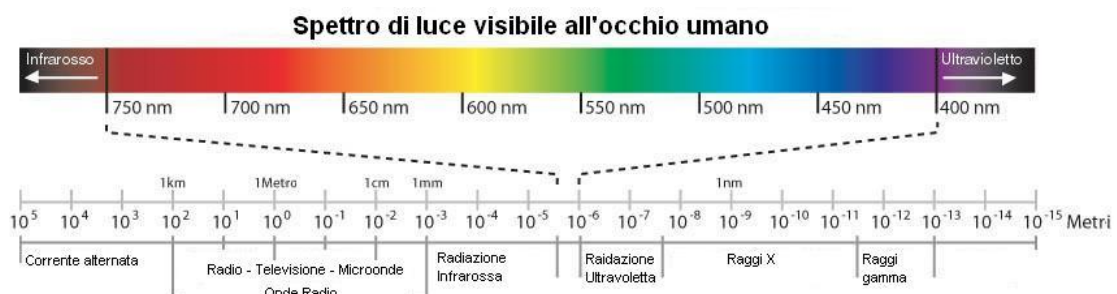


Figura 2-4 - Spettro elettromagnetico

Ogni banda necessita ovviamente di un sensore dedicato, per cui sul satellite sono montati tanti elementi distinti quante sono le bande indagate.

Il TEMPO DI RIVISITAZIONE, che corrisponde al tempo che intercorre tra due passaggi successivi sulla medesima area, ed è ovviamente dipendente dal tempo impiegato dal satellite per completare un'orbita, di solito pari ad alcuni giorni. Tale intervallo coincide con la RISOLUZIONE TEMPORALE ASSOLUTA, vale a dire alla possibilità di acquisire una seconda immagine di una stessa porzione di territorio esattamente con lo stesso angolo di acquisizione del passaggio precedente (normalmente in posizione nadirale). Sfruttando invece la possibilità di ruotare il sensore (aumentando di conseguenza l'angolo di off nadir) e la sovrapposizione laterale tra strisciate adiacenti (con percentuali di ricopertura che aumentano all'aumentare della latitudine e dallo swath del sensore), tale valore può essere sensibilmente ridotto (fino anche ad un solo giorno).

Definite le peculiarità del singolo sensore, i **sistemi di acquisizione**, che immagazzinano le immagini sottoforma di strisciate, possono essere:

- *scanner across track*: montano sensori whiskbroom elettromeccanici che impiegano un meccanismo opto-meccanico, in cui la radiazione elettromagnetica è inviata all'unico elemento CCD installato tramite un dispositivo meccanico costituito da uno specchio. Tale specchio è oscillante e ruotante, per cui si acquisiscono una serie contigua di strisce di terreno adiacenti in direzione perpendicolare a quella di volo del satellite, il cui movimento garantisce la copertura delle linee successive. Con questi sensori le immagini stereo vengono acquisite lungo due orbite distinte.

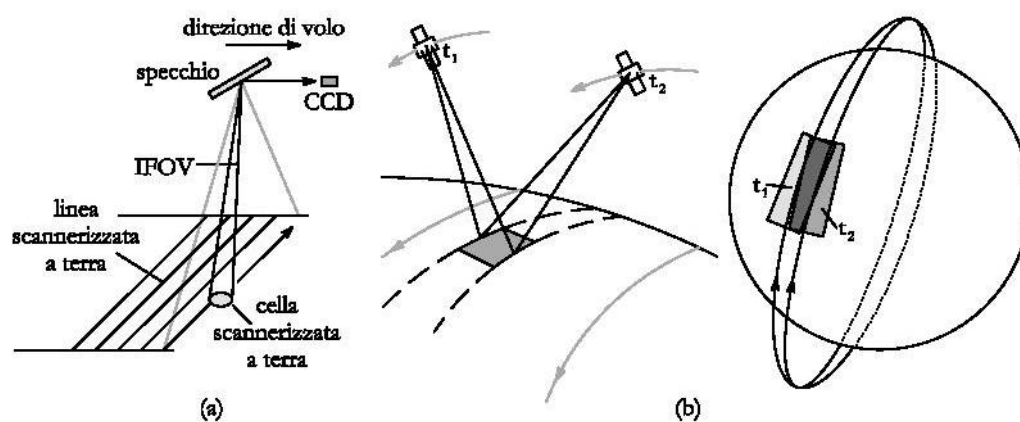


Figura 2-5 - Sensore whiskbroom (a); acquisizione di stereocoppie across-track (b)

- *scanner along track*: montano sensori pushbroom funzionanti con scansione elettro-ottica: si ha un array lineare di sensori CCD per ogni banda spettrale, disposto sul piano focale in posizione perpendicolare a quella di volo, in cui ogni singolo elemento dell'array corrisponde ad un pixel a terra. Tale sistema permette quindi l'acquisizione contemporanea di intere linee con diversa direzione (nadirale e non) la cui larghezza (swath) corrisponde a quella dell'array stesso. In questo caso le immagini stereoscopiche sono acquisite lungo la stessa orbita (solamente con differenze temporali di secondi).

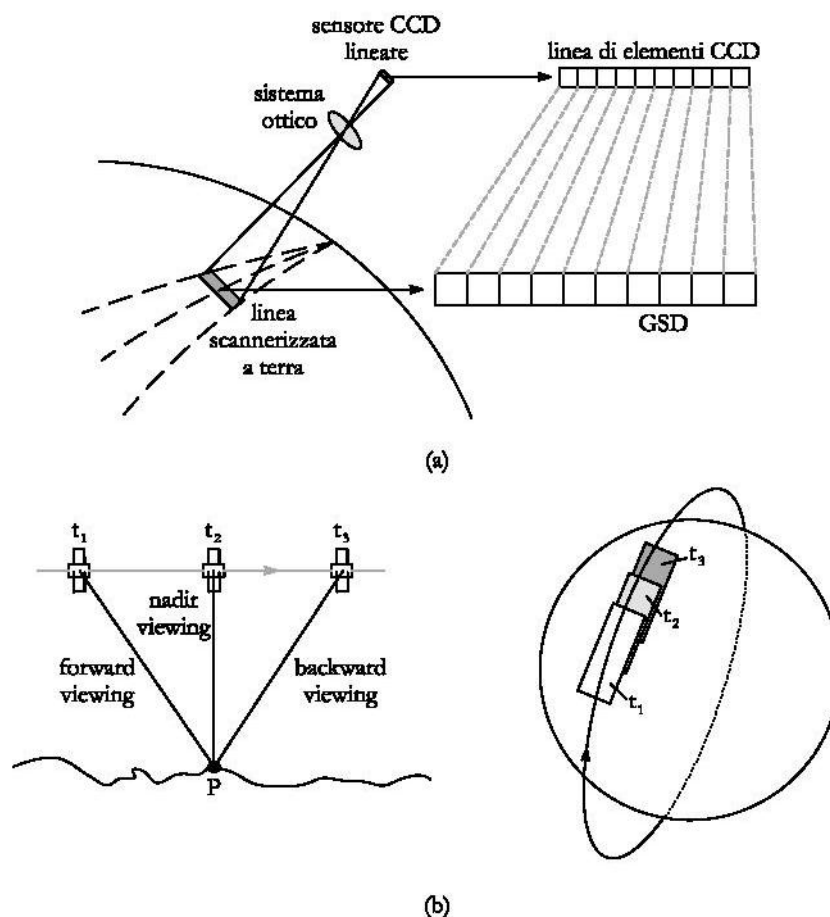


Figura 2-6 - Sensore pushbroom (a); acquisizione di stereocoppie in-track (b)

A differenza dei precedenti, ogni pixel dell'array può immagazzinare energia dalla medesima porzione di territorio per un tempo maggiore, con vantaggi in termini di risoluzione radiometrica, di riduzione dell'IFOV (a favore di una miglior risoluzione spaziale) e della larghezza della banda dello spettro multispettrale indagata da ogni sensore (miglior risoluzione spettrale). Di contro, la calibrazione di migliaia di detector nell'array diviene molto più onerosa. L'acquisizione, continua, deve però permettere all'array di scaricare le informazioni immagazzinate in ogni singola strisciata: il tempo necessario all'acquisizione ed al trasferimento del dato è definito TEMPO DI INTEGRAZIONE. In fase di progettazione bisogna pertanto fare in modo che tra due istanti di acquisizione successivi sia garantito tale intervallo di tempo; in aggiunta, per far sì che la griglia creata sia quadrata, tale tempo è calcolato in modo che la dimensione a terra del singolo detector sia uguale allo spazio percorso dal satellite [21]:

$$\Delta x = v\Delta t_s = \frac{pH}{f} = a_y$$

con:

Δx : spazio percorso nella direzione di moto del satellite;

v : velocità della piattaforma;

Δt_s : tempo di integrazione;

P: dimensione del pixel (supposto quadrato, per cui $p_x = p_y = P$);

H: quota di volo;

f: lunghezza focale dell'ottica;

a_y : impronta al suolo del singolo detector dell'array;

da cui, con $a_y = a_x$:

$$\Delta t_s = pH/vf$$

Allo stesso modo, si può risalire al valore di Δt_s come:

$$V_s = 2\pi R/60T \quad \text{da cui} \quad \Delta t_s = ATR/V_s$$

con:

R: raggio della sfera locale;

T: durata di un'orbita;

60: fattore di conversione del tempo;

ATR: risoluzione along track, espressa in Km;

V_s : velocità del satellite in Km/s.

Entrambe le tipologie descritte sono solitamente progettate con **modalità di acquisizione SINCRONA**, vale a dire, nel caso di orbite quasi circolari, con velocità di acquisizione della camera e del satellite a terra dipendente esclusivamente dalla quota di volo (IKONOS II, Quickbird, Spot 5).

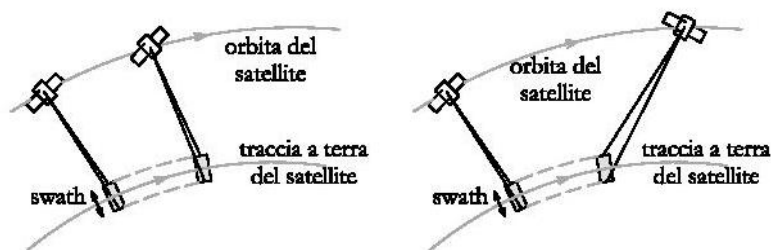


Figura 2-7 - Acquisizione sincrona (a sinistra) e asincrona (a destra)

In realtà è possibile effettuare la presa anche in MODALITÀ ASINCRONA (IKONOS II, QuickBird, Eros A1), vale a dire con velocità di acquisizione inferiore a quella di moto del satellite. Per ottenere tale risultato il sensore, solidale al corpo del satellite, deve ruotare all'indietro mentre la piattaforma avanza, garantendo per ogni strisciata un tempo di integrazione sufficiente. Tale intervallo di tempo viene identificato scena per scena in base alle condizioni di luminosità (latitudine dell'area e giorno dell'anno) in modo da ottimizzare il flusso energetico incidente sul sensore. Questa rotazione del sensore fa sì che l'area inquadrata in ogni singola strisciata assuma una forma pseudo-trapezoidale o a farfalla, con conseguente variazione della dimensione del pixel al suolo d e dunque della risoluzione spaziale, che risulta massima nella zona centrale dell'immagine, in cui la distanza del satellite dalla Terra è la minima:

$$\begin{cases} d' = d/\cos \gamma & \text{in direzione across track} \\ d'' = d/(\cos \gamma)^2 & \text{in direzione along track} \end{cases}$$

con γ angolo di off nadir.

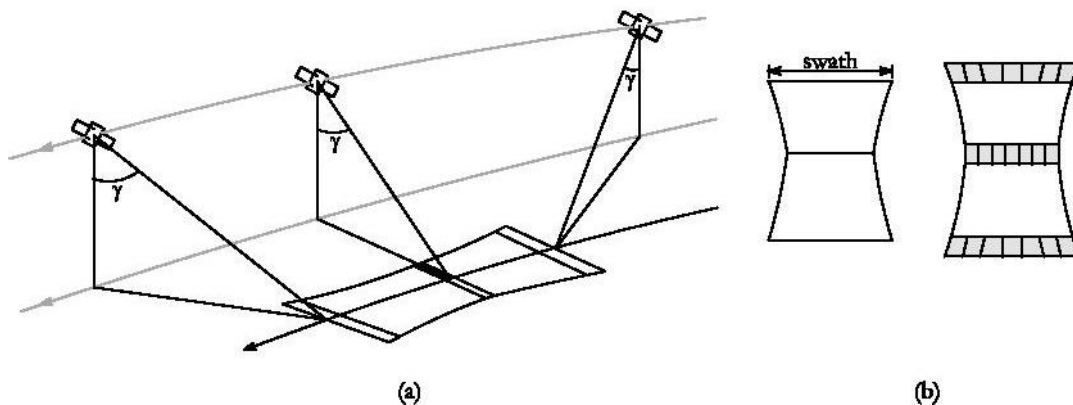


Figura 2-8 - Acquisizione asincrona (a); forma a farfalla dell'immagine acquisita (b)

Ulteriore distinzione deve essere fatta in base alla **direzione di acquisizione dell'immagine**, che per alcuni satelliti (IKONOS II) può essere fatta a determinati azimuth (punto di inizio scansione, misurato in senso orario a partire dal Nord) e con una ben precisa direzione di acquisizione (IKONOS II, WorldView-1):

- *forward* quando il satellite acquisisce le immagini in direzione opposta al movimento lungo l'orbita;
- *reverse* in caso contrario.

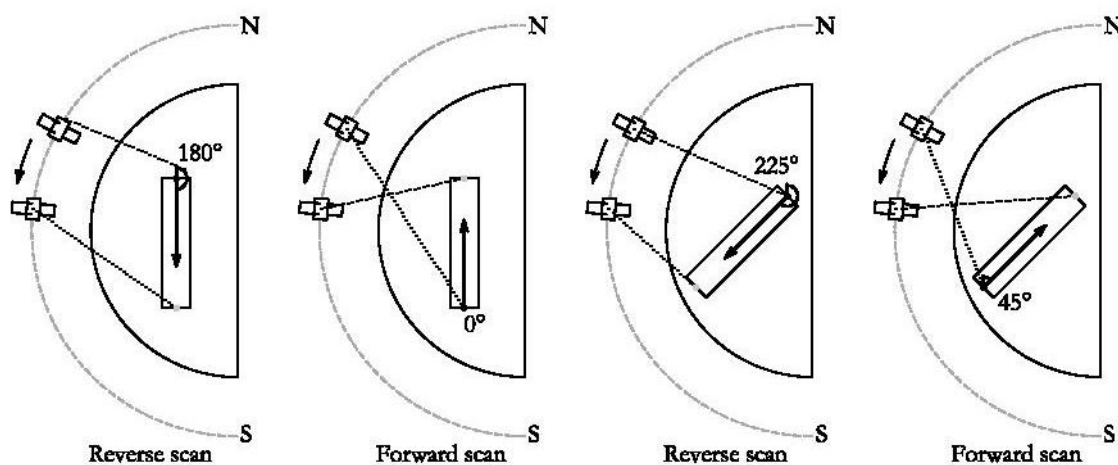


Figura 2-9 - Direzione di acquisizione

Infine, altri due aspetti fondamentali legati alla tecnologia costruttiva del sensore devono essere ben valutati in quanto hanno forti ripercussioni sulla qualità dell'immagine acquisita:

data l'elevata lunghezza complessiva dei sensori, essi sono solitamente costituiti da più elementi separati di larghezza limitata (ad esempio 3 per IKONOS II, 6 per QuickBird) parzialmente sovrapposti nella direzione di sviluppo del sensore e sfalsati in direzione perpendicolare. Durante la procedura di lancio possono però generarsi dei piccolissimi spostamenti relativi tra i diversi componenti sia nel piano focale che esternamente ad esso, rendendo dunque necessarie pre-elaborazioni delle immagini prima della fusione dei dati parziali acquisiti dai singoli sensori. Diventa così assai importante l'**in-flight calibration**, utile sia per rimediare a variazioni subite dal sensore durante il lancio, che modificano i valori determinati in laboratorio durante l'installazione, sia per determinare alcuni parametri non identificabili in maniera corretta durante le calibrazioni di laboratorio [5]. Per tale operazione ovviamente le compagnie che gestiscono la piattaforma eseguono apposite misurazioni che devono essere ripetute con una buona frequenza durante tutta la vita del satellite e non solamente nel periodo immediatamente successivo al lancio, talvolta ricorrendo a testfields, anche se il loro impiego è dispendioso ad a volte insufficiente: questo è tipico per camere con ridotti campi visivi una geometria complessa del piano focale e molti parametri da valutare strettamente correlati e difficilmente determinabili.

- i CCD installati su diverse piattaforme (IKONOS II, EROS B, QuickBird, OrbView-3) impiegano la con **tecnologia TDI** (Time Delay Integration) [4][30], e sono quindi costruiti in modo che ogni linea dell'array sia costituita da più linee (stages) che accumulano il segnale ricevuto dalla scena inquadrata. Questa necessità è dovuta al fatto che, volando a velocità di circa 7Km/s e dovendo garantire GSD anche inferiori al metro, i tempi di integrazione dovrebbero essere all'incirca $1 \div 1.5$ ms, dunque troppo ridotti per ottenere un'immagine di buona qualità. Con tale tecnologia è quindi possibile risolvere il problema, in quanto la prima linea può trasferire a quella adiacente la propria carica in modo da poter accumulare più energia e così via per le linee successive; un limite massimo di circa 30 linee è dettato da impedimenti con linee di vista inclinate (per IKONOS si hanno 16 linee ognuna con un tempo di integrazione di 2.7ms). Un possibile svantaggio di tale tecnologia è rappresentato da un effetto di smoothing, specialmente nella direzione di volo, dovuto alla non perfetta capacità delle singole linee di acquisire la porzione corretta di territorio generando pertanto un mescolamento dell'informazione. Le metodologie di correzione applicate tendono ad eliminare tale problema generando però una serie di artefatti che possono comunque ostacolare le elaborazioni (§4.4).

3. Modelli altimetrici digitali

3.1. Introduzione

Come accennato già nella descrizione del processo fotogrammetrico, prodotto finale delle elaborazioni è un modello, vale a dire un oggetto (se fisico) o un concetto (se virtuale) impiegato per la descrizione di un dato fenomeno o per offrire una rappresentazione in scala della realtà.

Per quanto riguarda la rappresentazione morfologica del terreno, si è soliti utilizzare l'acronimo DTM, vale a dire Digital Terrain Model (Modello Digitale del Terreno). Tale terminologia fu introdotta nel 1958 da Miller e La Flamme, due ingegneri del Massachusetts Institute of Technology che definirono il DTM come “*una rappresentazione statistica di una superficie continua del terreno attraverso un numero elevato di punti noti nelle coordinate x, y, z relative ad un sistema arbitrario di riferimento*” [36]. Esso risulta quindi essere un insieme anche molto numeroso di dati che permette di calcolare la quota di un punto arbitrario del terreno con precisione assegnata ricorrendo al metodo dell'interpolazione, rappresentando così tridimensionalmente una qualunque porzione della superficie terrestre.

L'introduzione di tale modello rappresentò dunque un importante progresso rispetto alla canonica rappresentazione altimetrica tramite curve di livello. Non fu più necessario intuire la morfologia del terreno interpretando la successione delle varie curve, che solo lungo la linea stessa danno informazioni sulla quota e devono rendere a volte accentuata la forma del terreno per renderla immediatamente percepibile. Dalla semplice visualizzazione del terreno si passò così all'inserimento di dati capaci di descrivere l'intero territorio e di essere ulteriormente trattati e sfruttati per varie applicazioni.

In aggiunta, la possibilità di disporre di dati digitali e non più solamente analogici offriva ulteriori importanti vantaggi:

- durabilità dei dati nel tempo;
- possibilità di rappresentare in diverse scale e forme il prodotto finale;
- possibilità di automatizzare e velocizzare le procedure e l'esecuzione dei calcoli necessari;
- maggior facilità nell'aggiornamento dei dati.

Inizialmente fu l'utilizzo nel campo dell'ingegneria civile, ed in particolare nella realizzazione delle strade, quello predominante, cui solamente in un secondo momento si affiancò l'uso in topografia. Contemporaneamente, studi e dibattiti proseguivano per cercare di migliorare le tecniche di acquisizione e strutturazione dei dati e le procedure di interpolazione degli stessi. Solo lo sviluppo di computer moderni agli inizi degli anni Ottanta chiarì l'importanza di tale modello e lo rese applicabile in numerosi campi. Questo portò anche alla suddivisione in diverse tipologie di modelli digitali del territorio, spesso usate oggi come sinonimi ma che in realtà si differenziano per la tipologia di dati contenuti e quindi per l'uso che è possibile fare del prodotto finito. Si distinguono pertanto [46][13]:

- *Digital Elevation Model, DEM* (Modello digitale delle altezze): modello diffuso negli USA, indica la creazione di una griglia regolare di altezze sopra il terreno, dove il termine altezza

permette il ricorso sia a dati relativi alla quota definita in termini geodetici e cartografici che a semplici sistemi locali. Per la loro realizzazione si ricorre solitamente a metodi fotogrammetrici o cartografici, di rado a rilevamenti sul campo;

- *Digital Height Model, DHM* (Modello digitale delle quote): termine usato in Germania; considerando il fatto che altezza e quota sono sinonimi, si ha la coincidenza di tale modello con il DEM;
- *Digital Ground Model, DGM* (Modello digitale della superficie terrestre): usato in passato in Gran Bretagna (oggi sostituito dal DTM), indica il modello digitale della superficie solida della terra;
- *Digital Terrain Model, DTM* (Modello digitale del terreno): è il più complesso, poiché non si limita ad includere esclusivamente le quote, ma contiene anche altre caratteristiche geografiche e naturali (fiumi, linee, spartiacque, ...), contenendo informazioni planimetriche, tridimensionali e descrittive del terreno (pendenza, morfologia, ...);
- *Digital Surface Model, DSM* (Modello digitale della superficie): descrive la superficie fisica del territorio, compresi i manufatti (infrastrutture, edifici, ...) e le alberature;
- *Digital Terrain Elevation Data, DTED*: termine utilizzato dalla US Defense Mapping Agency, presuppone esclusivamente il ricorso ad un modello a griglia regolare.
- *Triangulated Irregular Network, TIN*: indica una ben specifica procedura di realizzazione basata sull'utilizzo di triangoli che uniscono punti disposti in maniera irregolare.

La realizzazione di un DTM risulta quindi la più complessa: “terrain” indica una porzione di territorio riferito alla sua configurazione naturale, perciò esso rappresenta una visuale particolareggiata della configurazione di un’area, a differenza di un TIN o DEM, dove “elevation” corrisponde alla generica quota sull’orizzonte o sul livello del mare [42].

In funzione del tipo di modello adottato, pertanto, diversi sono gli elementi che lo caratterizzano: punti isolati, curve di livello, breaklines, creste, delimitazioni di aree non comprese, limiti dell’area da rappresentare, tutti dati che devono essere campionati con una densità tale da consentire una distribuzione uniforme delle informazioni altimetriche. Nel caso i soli punti permettano di descrivere in modo esaustivo l’andamento del territorio non è più necessario identificare in modo diretto le discontinuità: si parla in questo caso di modelli digitali densi (ad esempio DDTM, DDEM, DDSM). Parametro fondamentale è comunque la tecnica di acquisizione del dato, che in termini di costi e di dati elaborabili vincola tutte le fasi successive e soprattutto la precisione del prodotto finale ricavabile.

3.2. Tecniche di acquisizione del dato

Grazie allo sviluppo della tecnologia e delle strumentazioni adottabili, ormai tutte le discipline del rilevamento possono essere impiegate per l’acquisizione dei dati di partenza da cui derivare un modello della superficie. Sono dunque i mezzi a disposizione, le finalità, i tempi ed i costi a vincolare

la scelta del metodo ottimale, magari con il raggiungimento di qualità elevate tramite passaggi intermedi e fondendo informazioni derivate da più fonti.

3.2.1. Impiego di cartografia esistente

Nel caso in cui la cartografia sia solamente su supporto cartaceo, due sono le possibilità per ottenerne una digitalizzazione. Lavorando direttamente da un originale o da un supporto comunque indeformabile, per escludere ogni possibile fonte di errore e deformazione, si può eseguire mediante tavolo digitalizzatore, e dunque senza alcuna automazione, o con procedure semi-automatiche che sfruttano algoritmi di inseguimento automatico delle linee. In alternativa, si può eseguire una scansione dei supporti originali e procedere alla vettorializzazione delle immagini raster così ottenute mediante opportuni software.

Effettuata pertanto la vettorializzazione di tutti gli elementi di interesse presenti sulla carta è possibile procedere all'estrazione del modello, la cui precisione finale dipende dunque da quella della cartografia di base, solitamente non elevata e sufficiente solo per studi preliminari; tali dati possono comunque essere una prima fonte di informazioni, ottenuta con costi bassi anche per vaste aree, da ampliare con rilievi mediante altre tecniche. Ovviamente un fattore importante è la data di realizzazione della carta, in quanto in aree con forte espansione e costruzione di abitazioni ed infrastrutture gran parte dei dati presenti risultano inadeguati.

3.2.2. Rilievo topografico

E' possibile sia effettuare un rilievo celerimetrico classico (teodolite e distanziometro, stazione totale) che impiegare strumentazione GPS. I punti ottenuti con entrambi i metodi hanno una distribuzione sparsa a piano quotato e la loro quantità è contenuta, per via del necessario stazionamento su ognuno di essi; inoltre, ovviamente, non si ha alcun grado di automazione, con conseguente aumento dei costi in funzione della dimensione dell'area da rilevare. È comunque buona la precisione dei dati ottenuti, solitamente centimetrica. È quindi una tecnica sfruttata principalmente per la realizzazione di rilievi di dettaglio, poiché rende possibile acquisire informazioni su oggetti e particolari relativi sia all'ambiente naturale che artificiale. Proprio per tale ragione si ricorre a tale scelta soprattutto quando si necessita di restituzioni a grande o grandissima scala, quali ad esempio centri storici, lottizzazioni di estensione ridotta, brevi tronchi stradali, siti in cui realizzare infrastrutture particolari come dighe, ponti o viadotti.

3.2.3. Fotogrammetria aerea

Essendo molte le possibilità d'utilizzo dei dati derivati da una campagna di rilievo fotogrammetrico ed essendo ancora elevati i costi di realizzazione, spesso si ricorre a tale scelta quando è appunto possibile sfruttare le informazioni raccolte per ottenere più prodotti (realizzazione di carte numeriche, produzione di ortofoto, realizzazione di DTM). I migliori risultati si ottengono poi ricorrendo a procedure con elevato grado di automazione, e in questo senso l'introduzione delle camere digitali ha garantito elevati standard di lavoro. Essa è ancora oggi largamente sfruttata, sia in

quanto ha portato per prima una forte componente automatizzata nel settore del rilievo topografico, sia perché permette di ottenere prodotti utili per scale di rappresentazioni sia grandi (1:1000) che medie (1:5000).

3.2.4. Fotogrammetria spaziale

Riferendosi in tal senso solamente ai dati derivanti da satelliti per l'acquisizione di immagini, grazie allo sviluppo tecnologico dei sensori montati a bordo, è possibile disporre di immagini stereoscopiche con risoluzione a terra inferiori al metro. Sfruttando dunque tecniche di elaborazione simili a quelle della fotogrammetria aerea, è possibile ricavare modelli del terreno su vaste aree con costi più contenuti. Impedimento maggiore al loro sviluppo sono stati fino ad ora il ridotto numero di piattaforme ad uso civile e la scarsa risoluzione delle immagini: gli unici DSMs con copertura globale disponibili e aggiornati con costanza da tempo sono quelli SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) e ASTER, ma presentano risoluzione di 30 o 90m che li rendono applicabili solo per indagini a piccola scala.

3.2.5. Interferometria SAR

La tecnica SAR (Synthetic Aperture Radar) presuppone l'utilizzo geometrico del radar interferometrico da satellite e rappresenta un'evoluzione della canonica applicazione del radar nel telerilevamento terrestre. Con questa tecnica si indaga il terreno colpendolo con fasci intermittenti di onde radio, registrate dall'antenna nei momenti in cui non emette, dopo che queste sono state riflesse dagli oggetti. In questo modo la risoluzione è indipendente dalla distanza dall'oggetto, e le immagini generate contengono un valore proporzionale alla potenza del segnale retro riflesso all'antenna dall'oggetto colpito. Le acquisizioni avvengono con due prese della stessa zona fatte da due orbite adiacenti, e i valori dei pixel corrispondenti sono sottratti per generare un interferogramma, ovvero un'immagine con le differenze di fase legate alla distanza dell'oggetto ripreso dall'antenna. L'accuratezza dei modelli estraibili è dell'ordine di alcuni metri e i costi sono ancora assai elevati.

3.2.6. LiDAR

L'acronimo indica Light Detection And Ranging, e la tecnica è conosciuta anche con i nomi di laser scanning, laser aviotrasportato, laser a scansione.

Consiste in un sistema laser installato su aerei o elicotteri per acquisire le coordinate di punti del terreno: il raggio laser emesso, cui possono essere sovrapposti anche altri segnali, percorre infatti il terreno con strisciate di ampiezza 0.25÷1m con un'adeguata area di sovrapposizione. In termini tecnici esso costituisce l'equivalente ottico di radar e sonar, sfruttando un raggio laser anziché microonde e onde sonar. È infatti possibile risalire anche in questo caso alla distanza misurando il tempo impiegato dal raggio emesso tra l'istante di emissione e quello di ricezione del segnale, nota ovviamente la velocità di propagazione. Il laser è un fascio di luce coerente di lunghezze d'onda dall'ultravioletto al infrarosso vicino, per cui rispetto alle onde radio permette di identificare oggetti di

dimensioni inferiori. E' sicuramente in grado di fornire le migliori precisioni per la realizzazione di modelli digitali, però è ancora la tecnica più costosa sia nella fase di acquisizione che in quella di trattamento del dato, in quanto si rende necessario un filtraggio degli stessi nel caso di riflessioni multiple del raggio emesso e l'editing di tutte le aree prive di risposta (lacune).

3.3. *La realizzazione del modello*

In funzione della tecnica di acquisizione adottata, diversa è la tipologia di informazione disponibile per l'estrazione del modello. Come descritto nell'introduzione, i modelli possono assumere nome diverso a seconda del tipo di informazione di quota che contengono. Per ottenere tale risultato si deve ricercare una funzione analitica del tipo $z=f(x,y)$ in maniera tale da raffigurare la superficie del territorio. Infatti è fondamentale determinare la quota z per ogni punto di generiche coordinate planimetriche x,y partendo esclusivamente dai punti o dalle altre informazioni acquisite.

Per realizzare tale modello di solito si ricorre a procedure interpolative, descritte nei paragrafi successivi, che si differenziano principalmente in funzione del tipo di metodo che si è scelto per identificare le varie regioni dello spazio analizzato:

- *nuvola di punti*: è costituita da un insieme di punti di coordinate note, disposti in maniera regolare o sparsa, senza alcuna informazione sull'andamento della quota nelle zone comprese tra i singoli punti acquisiti. Coincide dunque spesso con il dato grezzo di partenza o con uno step intermedio di elaborazione.
- *TIN (Triangulated Irregular Network)*: i punti di coordinate note nello spazio sono collegati mediante una serie continua di triangoli che generano superfici piane, basandosi solitamente sull'algoritmo di Delaunay. In tale modo tutti i punti sono impiegati nella realizzazione del modello, che in funzione dei parametri e delle regole di triangolazione può essere diverso partendo dallo stesso set di dati.
- *modello a matrice (GRID)*: si ha una suddivisione regolare dello spazio, nel quale si realizza una griglia regolare o irregolare che contiene i punti rilevati e che porta alla determinazione della quota nei nodi o nel centro di ciascuna cella tramite interpolazione dei dati acquisiti. Anche un modello per punti può pertanto essere espresso mediante una griglia, ma ad ogni cella così creata corrisponde un unico valore di quota (con cambiamenti dunque solo lungo i bordi delle celle); un modello a griglia vero e proprio descrive invece la variazione di quota in ogni cella mediante i valori dei quattro nodi che la costituiscono, per cui è possibile simulare una superficie continua.

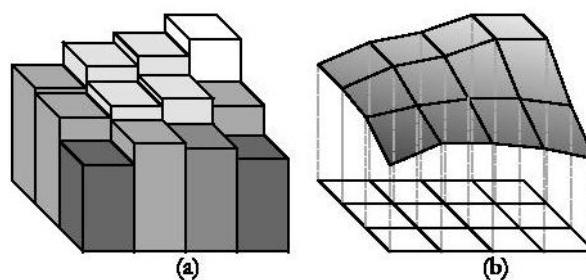


Figura 3-1 - Confronto tra modelli per punti (a) e modelli a griglia (b)

Concetto fondamentale è quindi quello di INTERPOLAZIONE, con la quale si intende la “procedura che consente di prevedere il valore di attributi di punti in regioni non campionati a partire dalle misurazioni effettuate in singoli punti con la stessa area o estensione” [10]. Per fare questo si considera come base di partenza l’assunzione che punti vicini tra loro nello spazio sono più probabilmente simili rispetto a quelli più lontani. Per indagini ed analisi tematiche questo è più che sufficiente: il risultato dà aree caratterizzate da valori ben precisi dell’elemento in studio, quale ad esempio intensità di pioggia, concentrazione di elementi chimici, Per quanto concerne lo studio del territorio, però, il solo risultato dell’interpolazione non è di per sé sufficiente: esso rappresenta la variazione delle caratteristiche del terreno nelle direzioni lungo cui esse sono raccolte (vale a dire i tre assi del sistema di riferimento) e sono evidenziate con i modelli a celle o con serie di linee anche combinati tra loro. Essa è pertanto solo una base di partenza per ottenere una rappresentazione che possa essere definita propriamente 3D, aspetto che presuppone la ricerca di superfici continue che descrivono il territorio e passanti per i punti noti; tali superfici possono essere confrontate e studiate per analizzarne differenze e caratteristiche a seconda del processo di elaborazione scelto e delle caratteristiche iniziali dei dati a disposizione.

L’interpolazione si applica solitamente se la superficie è identificata da un modello diverso da quello voluto, se i dati non coprono il dominio in studio (per il passaggio da punti campionati ad una superficie continua discretizzata), se la superficie discretizzata ha risoluzione, orientamento o grigliato diverso da quelli voluti.

I *metodi* usati sono definiti *globali* se sfruttano tutti i punti dell’area in esame: sono per questo motivo utili per identificare eventuali trend, che devono essere preventivamente eliminati per poi procedere all’interpolazione vera e propria, fondata solitamente sui principi statistici di varianza e regressione. Il loro difetto principale consiste nel restituire superfici con “effetto bordo” e spesso non corrette nell’area esterna a quella definita dai dati di partenza. Sono invece *metodi locali* quelli che si limitano ad analizzare punti in un intorno di quello da interpolare e che sono soliti comportare un “lisciamento” del comportamento dei dati.

Ancora, si parla di *modello deterministico* se il legame tra punti vicini deriva da leggi che si basano su parametri fisici, mentre si ha un *modello stocastico* se il legame è di tipo statistico e non necessariamente riconducibile a leggi fisiche. Differenza principale tra i due riguarda la stima dell’errore commesso: mentre nei modelli deterministici è impossibile avere informazioni al riguardo, l’errore sulla

previsione del dato è sempre ricavabile nei metodi statistici. Questa possibilità rende quindi più facile cercare di ottenere forma, dimensione ed orientamento più corretti per la finestra di interpolazione in modo da garantire una stima più accurata, cercare alternative alle funzioni peso basate sulla distanza e valutare la precisione dei dati ottenuti interpolando, permettendo quindi la ricerca della miglior funzione interpolativa possibile (Best Linear Unbiased Estimated). Inoltre, dato che solitamente le variazioni spaziali sono irregolari, è difficile ottenere una rappresentazione che ricorre ad una funzione matematica semplice e sia priva di grosse approssimazioni, altra considerazione che porta spesso ad optare per metodi stocastici.

3.3.1. Il modello a griglia regolare

E' il prodotto tipico con dati fotogrammetrici ed è la soluzione più adottata per la rappresentazione digitale. Si ottiene la determinazione delle quote del terreno ricorrendo ad una griglia regolare solitamente di forma quadrata in cui i dati sono distribuiti uniformemente ai nodi del reticolo. Per identificarla si visualizza solitamente una "finestra", suddivisa dal reticolo stesso in celle, contenenti l'attributo in studio (quota o attributo tematico) di uno dei nodi che la costituiscono.

Solitamente tale proprietà è costante per ogni cella o espressa esclusivamente in relazione al baricentro della cella stessa e la si interpola per gli altri punti della cella. Aspetto molto importante è quindi il passo della griglia, la cui determinazione dipende sia dalla risoluzione dei dati a disposizione che dal livello di dettaglio di cui si necessita nel modello finale. Allo stesso tempo, nonostante lo sviluppo tecnologico e la capacità di gestire grosse moli di informazioni, si hanno ancora limiti inferiori per il passo della griglia dovuti ad incapacità spesso dei software nella gestione di quantità molto elevate di punti. Per ovviare a tale inconveniente, può risultare comodo sovrapporre insieme diversi di dati caratterizzati da diverso passo di griglia in maniera tale da raggiungere il livello desiderato di dettaglio in ogni situazione; per fare questo è bene mantenere la coincidenza tra le griglie realizzandole con passi multipli del minore.

Dati di input possono essere curve di livello, breaklines e punti quotati isolati, questi ultimi disposti sia in maniera uniforme che irregolare ed anche non coincidenti con i nodi della griglia prefissata. Essendo pertanto il caso di punti direttamente identificabili con un grigliato assai poco frequente, è quasi sempre necessario ricorrere all'interpolazione dei dati iniziali. I metodi più usati sono quelli locali, che prevedono la definizione dell'area di analisi circostante il punto da interpolare e la ricerca dei punti in esso contenuti, la scelta di una funzione matematica che descriva la variazione locale dei valori dei punti e, infine, la valutazione di tale variazione su una griglia regolare. Di conseguenza, i parametri da valutare sono: tipo di funzione, dimensione e forma dell'area da analizzare e di quella di ricerca, pattern di ricerca (quadranti, ottanti, ...), numero di dati (che può essere preventivamente fissato o meno a secondo dell'area da indagare), tipo di griglia e ricerca di eventuali trend (anche ricorrendo ad altre funzioni esterne). Per scegliere la classe di funzioni più precisa al fine di descrivere le variazioni territoriali ed in grado di non appesantire la procedura con elevati volumi di dati da calcolare, si ricorre ad una valutazione a posteriori con la stima dei

coefficienti e l'analisi della varianza, che giudica sia significatività dei parametri che qualità del modello. Le principali tecniche interpolative a disposizione sono dunque:

1. Metodi locali

- Nearest neighbour: assegna ad ogni punto appartenente al dominio il valore di quota del punto campionato ad esso più prossimo, ed è pertanto un buon metodo da usare quando si hanno dati campionati con disposizione casuale. Se da un lato quindi esso è molto semplice (non è necessario impostare parametri quali l'area di ricerca, il numero di punti da valutare e funzioni peso da usare, dà una soluzione unica e fa sì che la stima in un punto sia coincidente a quella dell'area in cui il punto stesso si trova) dall'altro però rende dipendente esclusivamente dai punti acquisiti la forma e le dimensioni delle regioni e non dà alcuna valutazione sull'errore di stima compiuto.
- Natural neighbour: analogo al precedente sia per la procedura operativa che per le peculiarità che lo definiscono, ne differisce esclusivamente per l'attribuzione della quota al punto incognito, in quanto realizzata la triangolazione di Delaunay, la quota del punto incognito viene determinata basandosi sulle distanze dai nodi del triangolo in cui esso è contenuto.
- Media mobile: il valore nel punto da interpolare è ricavato da una media dei valori compresi in un'area di forma variabile e simmetrica centrata in tale punto. L'elemento caratterizzante è quindi la finestra in cui si vanno a scegliere i punti: finestre piccole rendono evidenti le alte frequenze mentre comportamento opposto si ottiene con finestre grandi, che quindi comportano un lisciamento dei valori.
- Inverse Distance Weight (IDW): i punti acquisiti come nel caso precedente sono valutati in relazione alla loro posizione rispetto a quello di quota incognita, ed il loro contributo sul valore finale è ottenuto pesandolo tramite una funzione che consideri la distanza tra i due:
- Kriging: complessa procedura geostatistica che identifica il valore cercato come una variabile "locale", la cui variazione spaziale è ricavabile mediando una variabile deterministica, detta componente strutturale (che varia con andamento costante) ed una variabile random, cui è associato anche un rumore. Esso permette di valutare le caratteristiche spaziali di un fenomeno prima della scelta della superficie interpolante e la generazione di una stima di tale superficie anche partendo da dati sparsi, purché non siano caratterizzati da brusche variazioni. E' operativamente paragonabile all'IDW, anche se la funzione peso dipende anche dal comportamento globale dello spazio compreso tra i punti misurati.

2. Metodi globali

- Piano interpolatore: si considera l'elemento della griglia appartenente ad un piano interpolante le quote dei punti più vicini.
- Spline: preso un insieme di dati nell'intervallo $[a, b]$ si definisce una funzione spline di grado p con nodi nei punti x_i la funzione tale che:
 - in ogni intervallo $[x_i, x_{i+1}]$ con $i = 0, \dots, n - 1$ è un polinomio di grado p ;

- è continua sull'intervallo $[a, b]$ e lo sono le sue derivate successive.
- il suo numero di gradi di libertà è quindi $(p + 1)n - (n - 1)p = n + p$.

Si definiscono *spline regolari* quelle che generano una superficie interpolante liscia rispetto alla distribuzione dei punti acquisiti, in cui la definizione di un parametro peso identifica l'influenza delle derivate della superficie per minimizzarne la curvatura; sono invece *spline con tensione* quelle su cui si può controllare la curvatura della superficie grazie alle derivate successive (derivate seconde danno piani inclinati, derivate prime danno piani orizzontali), modellando funzioni anche in celle prive di dati iniziali, aspetto che le rende molto applicate soprattutto in problemi di estrapolazione. Per entrambe, comunque, è definibile anche il numero di punti sfruttati per l'interpolazione, numero che crescendo comporta ovviamente un lisciamiento della superficie estendendo l'analisi su vaste aree. Operativamente, si calcola la pendenza della superficie, forzata a passare per il punto, per ogni punto noto tramite l'adattamento di una superficie di trend su altri dati vicini. Successivamente, stimato il valore della superficie anche ai nodi della griglia, per ogni punto da interpolare si cercano gli n punti più vicini, dai quali si proietta la superficie di pendenza già calcolata e si fa una media pesata della stima, cercando di ridurre al massimo la differenza tra il valore stimato e quello attuale del punto sulla curva. In tal modo, però, la superficie ottenuta può non passare per tutti i punti misurati soprattutto per terreni non uniformi; va quindi scelto molto attentamente il grado della curva per la maggior o minor adattabilità a variazioni del territorio e, comunque, essa vi si avvicina il più possibile, di solito seguendo il principio dei minimi quadrati, o comunque un altro criterio matematico.

In conclusione, tra i vantaggi di tale modello si hanno la semplicità nell'organizzazione dei dati, la facilità di elaborazione (per la similitudine con le immagini raster è possibile usufruire delle risorse tipiche di tale settore, ben più avanzate e specializzate), la possibilità di integrazione con dati raster e di realizzare incroci tematici tra mappe con contenuti qualitativi differenti.

Di contro, è possibile riscontrare comportamenti anomali ai bordi della griglia, il passo deve essere ben valutato in funzione della tipologia di terreno da descrivere, la maggior importanza delle direzioni degli assi del reticolo può comportare distorsioni. Possibile rimedio a tali problemi si ottiene col CAMPIONAMENTO PROGRESSIVO, che, in maniera semiautomatica, esegue la creazione della griglia in modo iterativo, analizzando la densità di punti e la pendenza media del terreno in una maglia per raffittire la griglia solo in determinate zone dimezzando progressivamente il passo fino ad un valore minimo preimpostato.

3.3.2. Modello TIN

Con tale tecnica si "triangolano" i punti campionati, in modo da rappresentare il terreno tramite facce triangolari solitamente piane. La loro introduzione si deve agli studi di Peucker e del suo gruppo di lavoro alla fine degli anni Settanta volti ad eliminare alcuni problemi tipici del modello a griglia, primo tra tutti l'elevata mole di dati per terreni uniformi.

La creazione di tale modello parte dall'identificazione di una serie di triangoli interconnessi il più possibile equilateri e con i lati più piccoli possibile, calcolati mediante la triangolazione di spazi irregolari di Delaunay (1934), derivante dagli studi di Dirichlet per la decomposizione di un dominio in più poligoni convessi adiacenti non sovrapposti (1850): tale metodo garantisce che all'interno del cerchio circoscritto ai triangoli realizzati non sia presente nessun altro punto di quelli dell'insieme di partenza. Grande importanza hanno in tale metodo le breaklines, poiché viene impedita la triangolarizzazione tra punti opposti rispetto ad esse, che sono dunque solitamente prese come lati dei triangoli stessi.

Vantaggio principale di tale metodo consiste nel fatto che i dati di partenza sono spesso già disponibili e, in caso di nuova campagna di acquisizione, tutto quanto è stato ottenuto viene utilizzato per la realizzazione del modello, con in più la possibilità di aggiungere anche altre informazioni altimetriche rilevate, quali le breaklines. Risulta anche essere più flessibile ed adattabile con più facilità alle asperità ed irregolarità del terreno. Richiede poi, a parità di precisione, minori spazi di memorizzazione rispetto al modello a griglia (vista nel complesso, poiché il singolo punto comporta invece maggior dispendio di memoria); al contrario, la struttura dei dati e gli algoritmi di triangolazione usati sono però molto più complessi.

3.4. Prescrizioni tecniche e verifiche

Data la complessità della materia, dipendente da parametri appartenenti ad ambiti assai diversi tra loro (finalità tecniche, livelli di accuratezza raggiungibili, metodi e tempi di realizzazione, finanziamenti spesso da parte di amministrazioni pubbliche, ...), si è cercato, a livello nazionale, di dare unitarietà alle metodologie di realizzazione e di validazione di tali modelli. Ciò è stato fatto mediante il documento "Ortoimmagini 10k e modelli altimetrici - specifiche tecniche", redatto come atto conclusivo di un progetto di ricerca del *Centro Interregionale di Coordinamento e documentazione per le informazioni territoriali* (CISIS) volto ad aggiornare la documentazione disponibile a livello nazionale in materia, come previsto dall'articolo 59 del Codice dell'Amministrazione Digitale [13].

Tra le prescrizioni generali si hanno quelle inerenti il sistema di riferimento, definito in base a:

- sistema geodetico (datum) ETRS89, nella sua realizzazione ETRF89 o più recente (Ellissoide WGS84);
- rappresentazione conforme UTM (coordinate cartografiche UTM/WGS84);
- geoidi come superficie di riferimento delle quote (ortometriche);

in tale sistema il legame tra quote ellissoidiche ed ortometriche è costituito dal modello di geoidi più recente (ITALGEO2005) fornito dall'Istituto Geografico Militare (IGM). Trasformazioni a differenti sistemi geodetici-cartografici devono essere eseguite con strumenti forniti dall'IGM (software VERTO3), regolarizzando poi nuovamente i dati ottenuti.

Altre indicazioni sono relative a:

- spaziatura della griglia, in funzione della precisione in quota e della scala di rappresentazione;

-
- precisione e tolleranza in dipendenza da errori accidentali (al variare del tipo di copertura del suolo) e sistematici;
 - linee caratteristiche, elementi che devono consentire la determinazione di tutto ciò che causa irregolarità all'interno di una maglia del grigliato maggiore della precisione planimetrica;
 - formato dei dati, in relazione a metadati, griglia e taglio dei file, dati vettoriali;
 - data del modello;

Tutti questi parametri permettono la classificazione dei modelli derivabili in 9 livelli di precisione, di cui sono riportati i limiti per ogni parametro, possibili aree di applicazione e sorgenti dei dati (Appendice II).

Per quanto riguarda le verifiche (descritte in maniera più dettagliata nei paragrafi 4.3.4 e 4.6), devono essere eseguiti sia controlli durante l'esecuzione delle elaborazioni che verifiche di qualità sul prodotto finale.

Le prime sono volte a garantire la correttezza di ogni singolo step e dipendono ovviamente dalle metodologie di rilievo e dai programmi impiegati durante il trattamento dei dati (nei paragrafi successivi si farà pertanto riferimento a quanto prescritto per la generazione di modelli mediante immagini satellitari); in generale, bisogna garantire una sufficiente densità dei punti in funzione del passo della griglia ed accertarsi dell'assenza di blunders.

I controlli finali si basano invece su confronti con set di dati di precisione più elevata e sul calcolo di opportuni parametri statistici.

Ovviamente, garantire buoni risultati per il prodotto è fondamentale per ogni singolo caso ma ha anche una validità maggiore: tutti i dati corretti che si sfruttano possono essere infatti messi a disposizione per ulteriori elaborazioni e scambiati tra differenti tecnici, aspetto che fa sì che non solo il posizionamento dei dati sia esatto, ma anche che le eventuali informazioni ad essi correlate siano incrementate ad ogni utilizzo dei dati stessi. In tal modo si viene ad organizzare una banca dati di grande importanza che può essere condivisa in diversi ambienti, non solo magari facenti capo alla stessa Società o Ente, possibilità che rende ancora più importanti gli sforzi nella ricerca di nuove metodologie realizzative e di prodotti elaborabili.

3.5. I prodotti derivati

Concluse le fasi di realizzazione e verifica del modello digitale del terreno vero e proprio, se ne devono valutare i possibili utilizzi nei diversi settori applicativi. Ricavabile in maniera rapida dal DTM stesso è infatti disponibile una vasta gamma di prodotti derivati che permettono di focalizzarsi solo su determinati particolari. Essi sono il risultato dell'applicazione di algoritmi più o meno articolati che consentono il passaggio tra diversi prodotti e forme di rappresentazione. Principale distinzione, a livello generale, è infatti proprio il modo in cui essi possono essere creati: raster e vettoriale. Ai primi si ricorre soprattutto in fase di visualizzazione dei dati, come complemento dei calcoli numerici,

mentre i secondi sono sfruttati per ortofotoproiezioni, applicazioni modellistiche e per integrazione con altri dati. Principali prodotti sono dunque:

- carta delle altezze: prodotto più comune, indica la variazione discreta dell'altimetria.
- carta delle curve di livello: prodotto più usato per indicare l'altimetria.
- carta delle pendenze (o dell'acclività): usata principalmente per individuare le linee di massima pendenza o derivare la mappa di concavità e convessità.
- carta dell'esposizione dei versanti: identifica la posizione rispetto al Nord della massima pendenza della superficie e l'insolazione dei versanti.
- visualizzazione 3D: usata in alternativa alla carta delle curve di livello, permette una visualizzazione prospettica o assonometrica dell'area, quindi con impatto visivo più accentuato ed immediato.
- carta di intervisibilità: permette di identificare la porzione di territorio direttamente visibile da un punto generico scelto dall'operatore (fissati azimuth di osservazione, angolo della visuale ed altezza della posizione).
- ambienti virtuali: permettono il movimento all'interno di modelli tridimensionali.
- profili: intersecano il terreno con piani verticali lungo assegnate direzioni.
- carta dei bacini: ottenute le linee di impluvio e displuvio è possibile definire con procedure automatiche aree rappresentanti bacini idrografici.

3.6. Le applicazioni dei DSM

Fino ad ora si è sempre fatto generico riferimento ad un'elevata espansione dell'utilizzo di DSM in diversi campi di applicazione. Ciò si deve prevalentemente a due aspetti: la disponibilità di dati sempre più precisi ed aggiornati ricavabili da innumerevoli fonti, la diffusione di strumenti in grado di elaborare e gestire in maniera sempre più rapida ed efficiente i dati di cui si dispone. Questi due fattori hanno pertanto favorito la ricerca di metodi di indagine nuovi per affrontare problemi tradizionali in numerosi settori, e questo ha fatto sì che ormai l'utilizzo di DSM sia prassi comune in molteplici attività. Essi sono oggi messi in relazione con ogni tipo di grandezza spaziale planimetrica (vegetazione, proprietà, uso del territorio, ...) e sono notevolmente sfruttati non solo per opere artificiali, bensì anche per modellare e prevedere reazioni susseguenti a svariate tipologie di fenomeni naturali.

Per quanto riguarda poi l'aspetto della ricerca, data l'applicazione su vasti campi, essa è principalmente volta alla realizzazione di metodologie rapide ed efficienti per la produzione di DSM ed indirizzate soprattutto anche a garantire la loro precisione e qualità.

Tra i settori in cui l'uso dei modelli digitali del terreno è più diffuso si hanno dunque:

Analisi del territorio. valutazione e controllo di eventuali movimenti e deformazioni tramite l'analisi dei volumi tra DSM realizzati e dati di riferimento o tra DSM di differenti epoche (utile nella pianificazione di operazioni estrattive o in seguito ad eventi quali frane, valanghe, ...).

Analisi del suolo - Applicazioni geologiche. predizione della stabilità di suolo, versanti o alvei fluviali, in base ai gradienti della superficie del terreno. Da tali studi è quindi possibile valutare la coerenza sull'uso del suolo stesso ed individuare gli sfruttamenti potenzialmente più adatti. Diverse possibilità in ambito geologico, geofisico, geotecnico e vulcanologico, permettono di evidenziare deformazioni anche centimetriche del terreno se applicati ai risultati di immagini SAR. Inoltre, se accoppiati a rilevamenti sismici e prove in sito, consentono l'interpretazione di dati relativi al sottosuolo. Realizzato infatti il DTM, è possibile importare da diversi programmi tabelle ed elenchi relativi alla stratigrafia del territorio derivanti dalle prove e trasformarli in veri e propri database del software di elaborazione del modello. In tal modo i dati sono interrogabili dai punti di sondaggio e restituiscono tramite tabelle e rappresentazioni grafiche i risultati ottenuti. È infatti possibile realizzare anche modelli del sottosuolo definiti DTUM (Digital Tridimensional Underground Model), poiché diversi programmi sono in grado di interpolare i valori restituendo l'andamento spaziale del terreno con la suddivisione litologica relativa, capacità che quindi permette di restituire sezioni della zona in esame tagliando il terreno con piani variamente orientati ed inclinati.

Analisi idrologiche (idrografiche e idrauliche). analisi del flusso dell'acqua sulla superficie terrestre, magari anche modellando i diversi eventi pluviometrici che lo generano, e conseguente determinazione del volume dei fiumi e delle zone soggette a rischio di allagamento. In tal modo si ha uno strumento fondamentale non solo per la gestione ottimale delle risorse idriche, bensì anche per la protezione di tutto il territorio da eventi eccezionali.

In tale settore fondamentale risulta la qualità dei dati: è bene unire la quantità, magari derivante da immagini telerilevate, alla qualità, tipica dei punti rilevati in maniera tradizionale, per soddisfare sia le esigenze di un elevato numero di punti per descrivere ogni variazione del terreno che per garantire un elevato standard di precisione per non commettere errori grossolani di valutazione delle aree (un'applicazione pratica è descritta nel paragrafo 6.6.5).

Architettura - Pianificazione territoriale. valutazioni di impatto ambientale e progettazione urbana rese più agevoli sfruttando ad esempio viste assonometriche e prospettiche di progetti e manufatti in costruzione; possibili vantaggi anche per applicazioni di city modeling.

Ingegneria civile. progettazione di infrastrutture e analisi dei volumi di terra da movimentare.

Cartografia. L'utilizzo del DTM è alla base di nuove applicazioni per la realizzazione di ortofoto e cartografia ottenuta da immagini satellitari.

Radiocomunicazioni. calcoli di intervisibilità e analisi delle caratteristiche della topografia nelle trasmissioni radio, aspetto che presuppone un'elevata qualità dei dati di partenza. In particolare, anche per la rete di telefonia mobile risulta un ottimo strumento, in quanto permette un'attenta analisi della morfologia del territorio per una corretta disposizione delle antenne e per una libera trasmissione dei dati via etere anche in ambiente urbano.

Tecnologie avanzate. elemento di supporto per sistemi di guida automatizzati.

Sistemi Informativi Territoriali. strumento di correlazione e di visualizzazione di tutti i differenti elementi tematici che essi permettono di gestire, dall'ambito ambientale-urbanistico a quello socio-economico. Un DSM infatti incrementa in diverse situazioni la leggibilità della carta ottenuta permettendo sempre l'introduzione di più informazioni contemporaneamente.

4. Generazione di DSM da immagini satellitari ad alta risoluzione

Scendendo quindi ora più nel dettaglio e focalizzando l'attenzione ai soli modelli digitali derivanti da immagini satellitari ad alta risoluzione, il processo di generazione si compone necessariamente di una serie di step strettamente legati tra loro. Effettuata la presa delle immagini, una prima serie di correzioni, dipendenti dal livello di dato richiesto e dalle caratteristiche del sensore, viene eseguita direttamente dal gestore della piattaforma satellitare. L'utente finale, entrato in possesso delle prese, in base alla metodologia di elaborazione adottata (orientamento delle stesse e tecnica di estrazione dell'informazione relativa alla quota), dovrà poi eseguire una serie di operazioni e di misure specifiche.

4.1. Acquisizione del dato

Variazioni quali l'angolo di acquisizione, il Sun angle e la relativa ombra sulla scena, la stagione e le condizioni atmosferiche, un'acquisizione monoscopica o stereo sono parametri che possono divenire rilevanti durante l'elaborazione delle immagini, anche se spesso indipendenti dall'utente finale. Ovviamente infatti, ordinata l'acquisizione di una determinata area e delle impostazioni limite accettate, la corretta esecuzione della stessa è affidata alla ditta che gestisce la piattaforma. È comunque bene richiedere e valutare (e di conseguenza verificare fin dall'anteprima delle immagini acquisite):

- l'assenza di copertura nuvolosa: spesso nei contratti stipulati durante l'ordine si deve accettare una possibile copertura pari al 20%;
- un corretto rapporto base di presa / altezza media di volo del satellite: rapporti B/H elevati aumentano la precisione della quota, ma allo stesso tempo causano forti variazioni di posizione degli edifici e comportano la creazione di ombre ed occlusioni che ostacolano la fase di matching, per cui sono consigliati valori non superiori a $0.5 \div 0.6$ [13];
- un angolo di off nadir $\leq 15^\circ$, per evitare deformazioni eccessive delle immagini;
- gli istanti di acquisizione delle immagini: immagini in-track sono più costose ma più semplici da trattare e generalmente danno migliori risultati nella fase di matching rispetto a quelle across-track;
- i metadati allegati: in funzione della piattaforma (e di conseguenza al grado di pre-processamento dell'immagine) diverse sono le informazioni contenute, necessarie all'implementazione dei modelli usati in tutto il processo di elaborazione.

4.2. Rilievo e caratteristiche dei Ground Points

Con Ground Point si intendono tutti i punti acquisiti a terra per poter eseguire le differenti elaborazioni descritte nei paragrafi successivi. Tali punti si dividono in:

- Ground Control Points (GCPs): necessari per effettuare l'orientamento e la correzione geometrica delle immagini (§4.3).
- Check Points (CPs): necessari sia per la valutazione dell'accuratezza ottenuta durante l'orientamento e la correzione geometrica delle immagini (§4.3.4) che per quella finale del modello digitale estratto (§4.6).

Per quanto riguarda i GCPs, le principali caratteristiche sono:

- distribuzione omogenea sull'intera immagine, con particolare attenzione ai bordi ed ai punti medi di ciascun lato, in quanto queste sono le zone più soggette a deformazioni. Prove di orientamento delle immagini eseguite con distribuzione asimmetrica dei GCPs hanno fornito un netto peggioramento, circa 1m, sull'accuratezza ottenibile [54].
- distribuzione omogenea anche per quanto riguarda le quote, in maniera da evitare estrapolazioni delle informazioni necessarie.
- facilità di localizzazione sia sulle immagini che sul territorio: devono essere scelte posizioni (meglio se stabili nel tempo) in cui è possibile fare stazionamento per rilevare le coordinate oggetto. Inoltre, se è possibile è bene selezionare nelle immagini zone con un buon contrasto. Buoni elementi sono rappresentati da marciapiedi, recinzioni, segnaletica stradale orizzontale, incroci, linee nei campi sportivi o nelle piscine, serbatoi (di altezza limitata), ponti. Una buona tipologia di punti è costituita dal centro delle rotonde, identificabile mediante la determinazione di almeno 6 punti lungo il perimetro ed un best fitting dell'ellisse mediante minimi quadrati, che permette di giungere ad un'accuratezza migliore di 0.2px (ovviamente non importa che i punti terreno e quelli manualmente riconosciuti sulle immagini siano i medesimi, il punto usato è il centroide dell'ellisse) [4][18]. In mancanza di punti isolati riconoscibili, è possibile impiegare anche l'intersezione di linee (utile in ambienti urbanizzati, parcheggi, strade, ...) [5]. Al contrario, gli angoli non sarebbero punti ottimali, in quanto il loro esatto posizionamento dipende dalla differenza di valore di grigio tra la parte chiara e quella scura dello spigolo: in generale, infatti, le parti brillanti delle immagini tendono ad ingrandirsi sia all'occhio umano che per effetti di blooming, comportando dunque precisioni minori nel posizionamento. Proprio per questo, sarebbero da preferire targets simmetrici poiché indipendenti nel loro posizionamento dal loro livello di grigio [34] (proprio per questo anche nel caso di intersezioni stradali e segnaletica orizzontale è bene identificare se possibile il punto baricentrico).
- numero sufficiente per ottenere una corretta stabilizzazione dei residui dell'orientamento (incrementare il numero di punti non comporta pertanto miglioramenti significativi della precisione). Tale valore è dipendente dal tipo di sensore impiegato, dal modello impiegato per l'orientamento, dalle caratteristiche geometriche dell'acquisizione, dal GSD dell'immagine, dall'area di studio dalla definizione ed accuratezza dei GCP e dell'accuratezza attesa.

Ovviamente è buona norma rilevare i GCPs una volta osservata attentamente l'immagine, per evitare di avere un elevato numero di punti da scartare perché non visibili.

La necessità di eseguire un rilievo diretto per acquisire le coordinate di tali punti o la possibilità di ricorrere a punti quotati in Carte Tecniche (con scala di rappresentazione opportuna) è vincolata da diversi fattori da valutare caso per caso:

- tipo di prodotto finale cercato e relativa precisione attesa;
- garanzia di una soglia di precisione minima, pari solitamente almeno alla metà della risoluzione geometrica dell'immagine satellitare;
- contenimento dei costi, per cui spesso le campagne di misura devono essere ridotte come estensione.

Per i CPs valgono considerazioni analoghe; si sottolinea che per un corretto controllo la distribuzione dovrebbe risultare il più possibile complementare a quella dei GCPs.

Infine, altra tipologia di punti impiegabile nel processo di elaborazione dell'immagine è costituita dai *Tie Points (TPs)*; questi sono punti di cui non si conoscono le coordinate terreno ma che vengono semplicemente riconosciuti sulle immagini. Un discreto numero di TPs può ridurre il numero di GCPs necessari ed aiutare la determinazione di punti omologhi durante la fase di matching [51].

4.3. *Correzione geometrica*

Permette di eliminare le deformazioni spaziali dovute alle condizioni di presa e genera una nuova immagine con proprietà di scala e proiettive di una rappresentazione cartografica, in modo da garantire la correttezza metrica dell'informazione contenuta. Tale problema è da sempre collegato all'acquisizione da satellite, ma per le prime piattaforme in orbita questo fattore era meno rilevante a causa delle lacune tecniche e tecnologiche legate all'elaborazione dei dati; al contrario, allo stato attuale, la loro importanza è diventata non più trascurabile principalmente in relazione a:

- acquisizione di immagini non nadirali e di alta risoluzione (le prime prese erano solamente nadirali e di scarsa risoluzione);
- disponibilità di prodotti completamente digitali (in passato immagini analogiche stampate su carta);
- interpretazione dei prodotti fatta al computer;
- integrazione di immagini di differente origine e formato (raster e vector) (in passato impossibile da realizzare).

Le principali cause di distorsione sono:

- il sistema di acquisizione (piattaforma, sensore e altri strumenti di acquisizione);

- l'oggetto dell'acquisizione (atmosfera e Terra).

Generalmente tali distorsioni geometriche sono note a priori o sistematiche e ben conosciute. Solitamente quelle derivanti dalla strumentazione sono corrette dai gestori del satellite, mentre quelle derivanti dall'atmosfera dipendono dalle condizioni di presa di ogni immagine e sono quindi troppo specifiche per essere corrette dai gestori.

Le deformazioni principali, legate a relazioni geometriche intercorrenti tra sensore, piattaforma e oggetto, sono relative a:

- movimento relativo tra satellite e terra: durante il tempo necessario per l'acquisizione dell'immagine, la Terra ruota da ovest a est, mentre il satellite si muove lungo la sua orbita da nord a sud. A causa di ciò si crea un disallineamento tra righe successive (skew): l'immagine acquisita ha comunque forma rettangolare, per cui è necessaria una traslazione progressiva di ogni riga verso ovest, generando un'immagine a forma di parallelogramma corrispondente alle reali condizioni di presa.
- caratteristiche di acquisizione del sistema a scansione (FOV e angoli di off nadir tipici durante la ripresa): l'IFOV del sensore è costante, per cui allontanandosi dal piede della verticale sensore-superficie l'impronta al suolo di ogni pixel aumenta, generando quella che viene definita distorsione panoramica, la cui correzione comporta una compressione di scala verso gli estremi di ogni riga di scansione.
- curvatura terrestre ed orografia della superficie: la superficie, anche nella distorsione panoramica, è in realtà spesso considerata piatta, ma tale approssimazione è da ritenersi valida solo per rilievi da aereo (quota di volo inferiore ai 5Km) o per immagini da satellite (quota di volo inferiore a 700-800Km e FOV inferiore a 15°). La presenza di rilievi altera la posizione dei punti che li identificano nell'immagine, in quanto non rappresentati mediante proiezione ortografica: per correggere tale effetto e ricavare le quote corrette dei punti è necessario un'informazione di quota dei punti sulla superficie, dunque disporre di un DEM.
- variazioni di posizione e assetto della piattaforma durante l'acquisizione dell'immagine: ridotte variazioni nella direzione di osservazione comportano ovviamente variazioni non trascurabili sull'area osservata, mentre mutamenti di quota del satellite comportano variazioni di scala lungo la traiettoria. L'assetto è definito rispetto ad un sistema di assi cartesiani ortogonali con centro sulla piattaforma, asse X tangente alla linea di volo, Z coincidente con la verticale e Y in modo da realizzare una terna destrorsa. Le variazioni angolari attorno a tali assi ed i relativi effetti sull'acquisizione sono pertanto:
 - beccheggio (pitch): angolo di inclinazione ϕ dovuto ad una rotazione nel piano XZ attorno all'asse Y, comporta un effetto di spostamento lungo la linea di volo sull'immagine acquisita;

- *imbardata (yaw)*: angolo di deriva θ dovuto ad una rotazione nel piano XY attorno all'asse Z, comporta un effetto di rotazione sull'immagine;
- *rollio (roll)*: angolo Ψ dovuto ad una rotazione nel piano YZ attorno all'asse X, comporta un effetto di spostamento in direzione ortogonale a quella di volo sull'immagine acquisita.

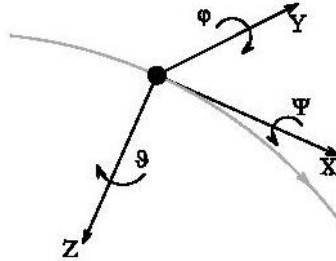


Figura 4-1 - Angoli di assetto

- variazioni di velocità della piattaforma possono alterare la spaziatura delle linee creando gaps o sovrapposizioni.

I metodi utili per la risoluzione di tali problemi devono pertanto basarsi su modelli del sensore in grado di porre in relazione coordinate oggetto tridimensionali e coordinate immagine bidimensionali.

I due tipi fondamentali di approccio sono:

- metodi rigorosi / fisici / analitici: analizzano il processo fisico-geometrico di generazione delle immagini identificando tutti i fenomeni di natura ben definita ed i cui effetti sull'immagine sono prevedibili. Le correzioni applicate sono relative sia agli effetti derivanti dall'osservazione terrestre che al sistema di acquisizione, di cui devono essere noti a priori dati inerenti l'assetto al momento della presa e le caratteristiche di costruzione.
- metodi sintetici / polinomiali: istituiscono una relazione puramente matematica tra punti riconosciuti direttamente sull'immagine e coordinate dei medesimi punti rilevate sul terreno, in maniera del tutto indipendente dalle caratteristiche del sensore impiegato e dalle condizioni di presa.

4.3.1. Modelli rigorosi

Un modello rigoroso si basa sull'impiego delle equazioni di collinearità e conduce alla ricostruzione del segmento orbitale all'istante di presa in funzione dei parametri orbitali, degli angoli di assetto, dei parametri di orientamento interno e di autocalibrazione, tutti valori noti in modo approssimato e le cui correzioni sono stimate col metodo dei minimi quadrati. A differenza però del caso fotogrammetrico tradizionale, l'acquisizione da satellite comporta migliaia di linee adiacenti ciascuna acquisita da una ben precisa posizione, legata alle caratteristiche orbitali della piattaforma, e con propri angoli di assetto. Determinare dunque le relazioni tra linee adiacenti è fondamentale per ricostruire la geometria completa della scena.

Per legare dunque tutti gli elementi necessari alla soluzione del problema forniti in maniera approssimata nel file metadata, è necessaria una serie di rotazioni per mettere in relazione i diversi sistemi di riferimento in cui ogni gruppo di informazioni è espresso.

- Sistema sensore (SS): l'origine è nel centro di presa, l'asse Z è parallelo all'asse ottico ed è diretto verso il sensore, l'asse X è diretto approssimativamente lungo la direzione di moto del satellite ed è a questa tangente, l'asse Y completa la terna destrorsa ed è approssimativamente parallelo all'array di elementi fotosensibili (a meno di rotazioni attorno all'asse Z).
- Sistema immagine (SI_m): bidimensionale, descrive la posizione di ciascun pixel nell'immagine. L'origine è nel primo pixel in alto a sinistra, l'asse Y è parallelo all'array con direzione concorde a quella del sistema sensore, mentre X è perpendicolare all'array nella direzione di moto del sensore. La sua rotazione rispetto al sistema sensore è dunque nulla, si ha solo una traslazione del centro del sistema.
- Sistema satellite (SS_a): allineato al sistema di volo quando i tre parametri di assetto sono nulli.
- Sistema di volo (SV): origine nel centro prospettico, asse X tangente all'orbita nella direzione di moto del satellite, asse Z contenuto nel piano orbitale e diretto verso il centro di massa terrestre, l'asse Y completa la terna destrorsa.
- Sistema orbitale (SO): il piano XY è quello orbitale, con asse X diretto lungo la linea nodale (intersezione tra piano orbitale ed equatoriale) ed assi Y e Z a completare la terna destrorsa (nell'ipotesi di orbita kepleriana la coordinata Z del satellite è dunque nulla).
- Sistema geocentrico inerziale (ECI, Earth Centered Inertial system) (SI): origine nel centro di massa terrestre, asse X diretto verso l'equinozio di primavera dell'epoca J2000 (1 gennaio 2000, ore 12 UT), asse Z diretto verso il Polo Nord celeste sempre dell'epoca J2000 e asse Y a completare la terna destrorsa.
- Sistema geocentrico (ECEF, Earth-Centered Earth-Fixed system) (SG): origine nel centro di massa terrestre, asse X definito dall'intersezione del piano equatoriale e di quello del meridiano di riferimento, asse Y a completare la terna destrorsa.
- Sistema geodetico locale (SL): centrato in un punto dell'ellissoide, asse N tangente al meridiano locale, asse E tangente al parallelo locale ed asse Up diretto lungo la normale all'ellissoide con direzione uscente.

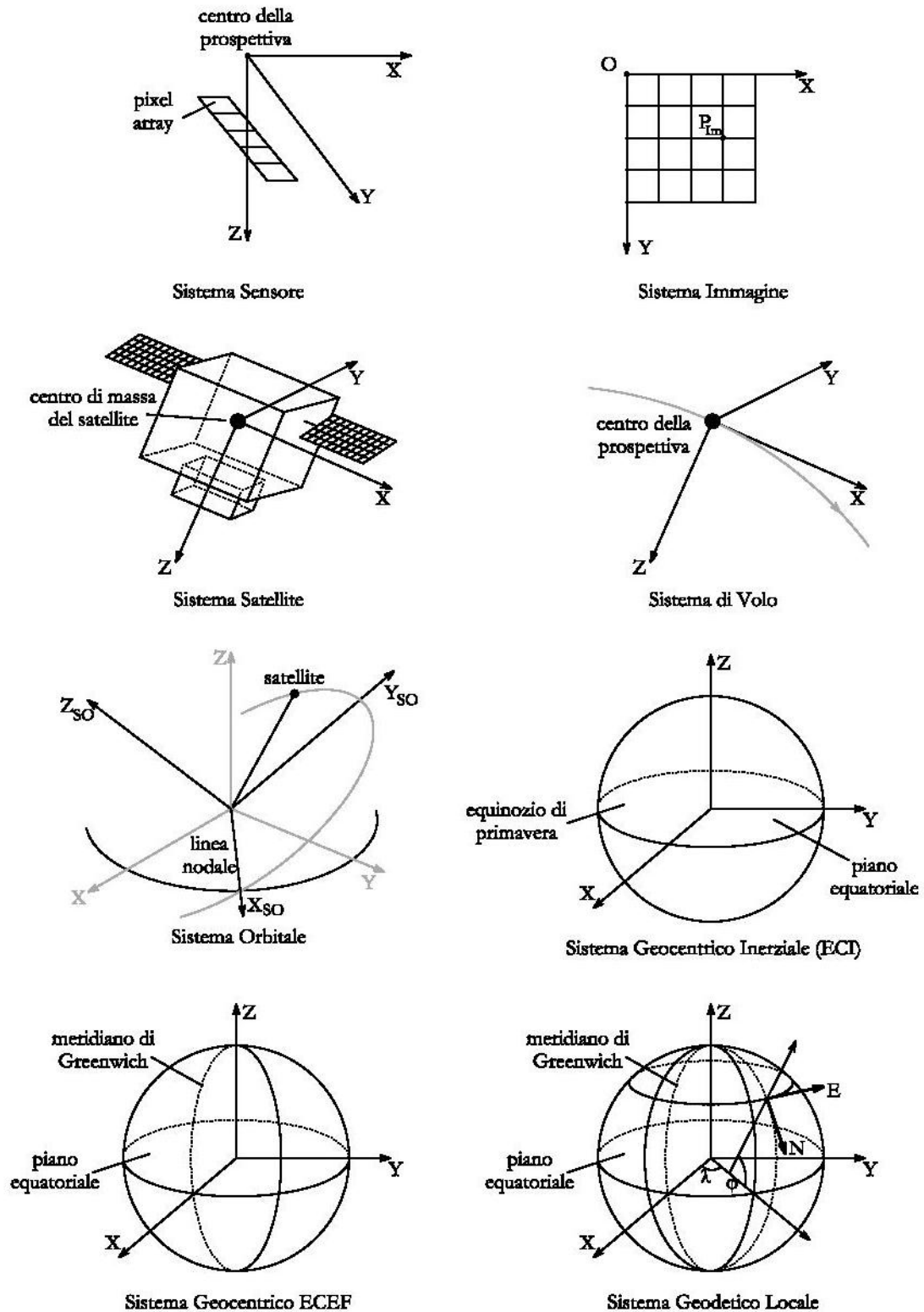


Figura 4-2 - Sistemi di riferimento

Definite le rotazioni attorno ai tre assi di un sistema cartesiano ortogonale, positive se orarie osservate in direzione del semiasse positivo della terna, come:

$$R_X(\omega) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{vmatrix}$$

$$R_Y(\phi) = \begin{vmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{vmatrix}$$

$$R_Z(\kappa) = \begin{vmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

la trasformazione globale che permette il passaggio dal sistema geocentrico inerziale a quello sensore è esprimibile come: $R_{SS-SI} = R_{SS-SSa} \cdot R_{SSa-SV} \cdot R_{SV-SI}$

dove:

R_{SV-SI} : per passare dal sistema geocentrico inerziale a quello di volo, funzione dei parametri orbitali kepleriani e variabile al variare del tempo, dunque della riga in acquisizione:

$R_{SV-SI} = R_X(-\pi/2) \cdot R_Z(\pi/2) \cdot R_Z(u) \cdot R_X(i) \cdot R_Z(\Omega)$ con $u = v + w$ (anomalia vera + argomento del perigeo, vedi oltre);

R_{SSa-SV} : per passare dal sistema di volo a quello satellite con gli angoli di assetto, dunque in funzione del tempo: $R_{SSa-SV} = R_Z(\psi) \cdot R_Y(\vartheta) \cdot R_X(\varphi)$;

R_{SS-SSa} : per il passaggio dal sistema satellite a quello del sensore, tiene conto della perdita di parallelismo tra i due sistemi, valore che si mantiene costante per ogni scena acquisita.

La rotazione dal sistema geocentrico inerziale a quello ECEF è poi scomponibile in più passaggi per tenere in considerazione i movimenti spaziali terrestri ed il fatto che l'asse di rotazione non è fisso:

$$R_{SE-SI} = R_M \cdot R_S \cdot R_N \cdot R_P$$

con

R_M : che descrive il moto polare (coordinate dell'asse di rotazione relativo al polo di riferimento IERS);

R_S : che descrive la rotazione terrestre attorno al proprio asse (e quindi descritta dal tempo siderale);

R_N : che descrive la nutazione (oscillazione periodica ed a breve termine dell'equatore, dovuto all'attrazione che Sole e Luna esercitano sulla Terra);

R_P : che descrive la precessione (cambio secolare di orientamento dell'asse di rotazione terrestre e dell'equinozio di primavera, dovuto all'attrazione che Sole e Luna esercitano sulla Terra).

Il passaggio diretto dal sistema ECEF a quello del sensore avviene dunque tramite:

$$R_{SE-SS} = R_{SE-SI} \cdot R_{SS-SI}^T = R_Z(\kappa) \cdot R_Y(\phi) \cdot R_X(\omega)$$

Con κ, ϕ, ω che definiscono l'assetto del satellite durante l'acquisizione della riga J-esima nel sistema ECEF.

Come detto nel paragrafo 2.2, l'orbita satellitare può essere descritta tramite le leggi di Keplero, secondo cui un punto materiale (il satellite) si muove in un piano descrivendo un'orbita ellittica se soggetto ad un campo gravitazionale generato da una massa concentrata in un punto. La posizione del satellite alla generica epoca T è esprimibile mediante sette **parametri orbitali**:

- semiasse maggiore (a): semiasse maggiore dell'orbita ellittica;
- inclinazione dell'orbita (i): angolo, positivo se antiorario, fra il piano orbitale e quello equatoriale (convenzionalmente valore compreso nell'intervallo $0 \div \pi$);
- ascensione destra del nodo ascendente (Ω): angolo al centro della Terra misurato dall'equinozio di primavera al nodo ascendente, positivo se antiorario osservandolo dal Polo Nord;
- eccentricità (e): eccentricità dell'orbita ellittica;
- anomalia vera (v): angolo misurato nel centro dell'ellisse tra il perigeo e la posizione del satellite all'epoca T , di valore 0 al perigeo;
- argomento del perigeo (ω): angolo tra la linea nodale ed il semiasse maggiore, misurato nel piano orbitale dal nodo ascendente al perigeo, definisce l'orientamento dell'orbita nel suo piano.
- tempo di passaggio al perigeo (T_p): tempo riferito all'epoca in cui il satellite è più vicino alla Terra.

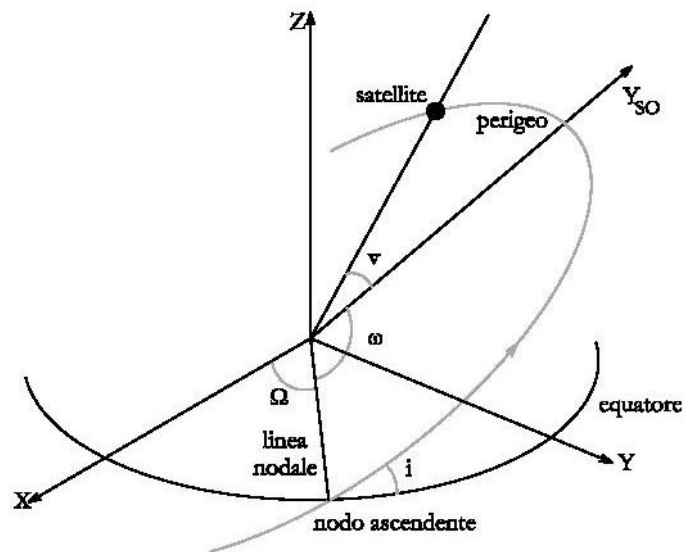


Figura 4-3 - Parametri orbitali

Per calcolare tali valori sono necessarie le effemeridi (informazioni relative a velocità e posizione del satellite ad intervalli di alcuni secondi), non sempre contenute in maniera esaustiva nel metadata file rilasciato assieme alle immagini (quali quelle GeoEye-1, QuickBird Standard OrthoReady, Cartosat-1, IKONOS II), in cui si ha invece un'unica posizione media del satellite espressa dai valori di:

- azimuth (α): positivo se orario e misurato dal Polo Nord, indica la posizione del satellite in relazione alla porzione di superficie terrestre acquisita.
- elevation (e): angolo misurato dall'orizzonte alla posizione del satellite.

Tali informazioni, assieme ad altre quali l'inclinazione dell'orbita ed il suo semiasse maggiore, comunque note, permettono di risalire anche agli altri valori incogniti [35].

Per quanto riguarda l'**assetto del sensore**, descritto al paragrafo 4.3 ed espresso come detto nel sistema di volo, i valori approssimati degli angoli sono stimabili sempre dal file metadata; le correzioni da applicare a tali valori possono essere ricavate dall'applicazione di polinomi di secondo ordine del tipo (che hanno dimostrato buoni risultati in diversi test eseguiti):

$$\begin{cases} \varphi = \tilde{\varphi} + a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \\ \theta = \tilde{\theta} + b_0 + b_1 t + b_2 t^2 \\ \psi = \tilde{\psi} + c_0 + c_1 t + c_2 t^2 \end{cases}$$

in cui t è il tempo di acquisizione del pixel del punto a terra espresso in secondi e i coefficienti a_i, b_i, c_i sono calcolabili con una soluzione ai minimi quadrati. In particolare, il tempo può essere espresso come $t = J_j \Delta t_s$ con Δt_s tempo di integrazione (§2.3) e J_j è la j -esima riga di acquisizione. Nel caso di acquisizione in modalità reverse (§2.3) la relazione diventa $t = (n_t - J_j) \Delta t_s$, con n_t numero totale delle righe dell'immagine. Se poi, in modalità forward, lo scan azimuth a è di 90° , la direzione di acquisizione (Ovest-Est) è perpendicolare a quella di moto del satellite, per cui per ogni pixel immagine è necessario applicare la rotazione $J_j = -J \cos \beta + I \sin \beta$.

Passando ai **parametri di orientamento interno**, questi descrivono gli elementi geometrici intrinseci del sensore: per sensori pushbroom si ricorre alla definizione della distanza focale f , distanza tra centro prospettico e piano focale. Per quanto riguarda invece i **parametri di autocalibrazione**, essi permettono di correggere errori geometrici tipici dell'array di CCD e del sistema ottico impiegato [44].

Riferendosi al sistema sensore, i principali errori dell'array CCD sono:

- *variazioni della dimensione del pixel* (p_x, p_y), che comportano variazioni di scala dp_x, dp_y ;
- *traslazioni e rotazioni del CCD nel piano focale*, che comportano shift costanti dp_c, dp_c e una rotazione $dx_\theta = y \text{sen} \theta$;
- *incurvamento del sensore nel piano focale* in direzione $x > 0$:

$$dx_{\delta'} = \frac{N_p p_y}{2 \text{sen} \delta / 2} (\cos \delta' - \cos \delta / 2)$$

con:

N_p : numero di pixel del sensore

δ : angolo al centro sotteso dall'intero sensore;

δ' : angolo al centro relativo al generico pixel;

Relativamente agli errori del sistema ottico si ha:

- spostamento del punto principale: spostamento del punto principale $P(x_p, y_p)$ di una quantità costante pari a $\Delta x_p, \Delta y_p$;
- variazioni della lunghezza focale Δf , per cui:

$$dx_f = -(\Delta f / f)(x - x_p)$$

$$dy_f = -(\Delta f / f)(y - y_p)$$

- distorsione radiale simmetrica, modellata con polinomi di ordine pari o dispari del tipo:

$$dx_r = (k_1 r^2 + k_2 r^4)(x - x_p)$$

$$dy_r = (k_1 r^2 + k_2 r^4)(y - y_p)$$

con $r^2 = (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2$ riconducibile a $r^2 = (y - y_p)^2$ in quanto la componente in x risulta trascurabile;

- distorsione da decentramento, modellabile a partire dalle relazioni di Brown con polinomi del tipo:

$$dx_d = P_1[r^2 + 2(x - x_p)^2] + 2P_2(x - x_p)(x - x_p)$$

$$dy_d = 2P_1(x - x_p)(x - x_p) + P_2[r^2 + 2(y - y_p)^2]$$

in cui solamente dy_d è significativo.

Data comunque l'elevata correlazione fra gli errori tipici del sensore e quelli del sistema ottico, tipicamente quelli implementati nella modellazione risultano essere:

- le coordinate del punto principale (valide anche per gli spostamenti del sensore nel piano focale), I_0, Y_0 ;
- la rotazione del sensore nel piano focale, k ;
- le variazioni della lunghezza focale (valide anche per la variazione della dimensione del pixel), Δf ;
- la distorsione simmetrica delle lenti in direzione y , d_1 .
- l'incurvamento nel piano focale, δ (in realtà non sempre valutato).

Ultimo aspetto da tenere in considerazione consiste nella **rifrazione atmosferica**, che comporta un incurvamento del percorso del raggio ottico dovuto alla progressiva diminuzione di densità dell'atmosfera allontanandosi dalla superficie. Tale effetto ha una differente ripercussione sulle immagini acquisite anche in funzione della risoluzione delle stesse e dell'assetto del satellite durante le prese; in aggiunta, le variazioni possono essere quasi omogenee su tutta la zona oppure avere una distribuzione disomogenea (in questo caso trovare quindi una soluzione a tale effetto comporta una miglior stima dei parametri incogniti). Per poter dunque applicare le equazioni di collinearità in maniera corretta, ovvero con raggi rettilinei, tale effetto deve essere modellato al fine di calcolare la coordinata immagine corretta di ciascun punto terreno. La soluzione più adottata consiste in un metodo analitico [39] per il calcolo dello spostamento d di ciascun punto terreno dovuto all'incurvamento del raggio, assumendo un'atmosfera a simmetria sferica; tale approccio si basa su 4 equazioni fondamentali:

1. legge rigorosa sulla rifrazione per il calcolo dell'angolo zenitale rifratto, z' :

$$z' = \arcsen(\frac{\text{sen } z_0}{\mu_0})$$

con:

z' : angolo zenitale sulla superficie terrestre in P' ;

z_0 : angolo zenitale in P ;

μ_0 : indice di rifrazione dell'aria al livello del mare.

2. equazione, discendente da relazioni geometriche, per lo spostamento del punto, d :

$$d = R(z_0 - z)$$

con:

R : raggio della Terra;

z : angolo zenitale tra il raggio non rifratto e la verticale nel punto reale di intersezione P' .

3. formula empirica per il calcolo dell'angolo zenitale nello spazio, z :

$$z = \left\{ \frac{\mu - 1}{1 + W/R} [tg(z) - 0.00117tg^3(z)] \right\} + z$$

con W altezza dello strato a densità uniforme.

4. formula empirica per il calcolo dell'indice di rifrazione dell'aria, μ :

$$\mu = 1 + \left(\frac{P}{P_0}\right)(\mu_0 - 1)$$

con $\frac{P}{P_0}$ rapporto tra densità ad una data altitudine e densità al livello del mare, calcolabile con un modello atmosferico che tiene in considerazione i valori caratteristici dell'aria al variare di pressione, quota, peso molecolare, latitudine.

Con riferimento alla Figura 4-4, il raggio rettilineo è PSp (con S centro della prospettiva e p punto immagine), ma il punto terreno P è in realtà proiettato in posizione P' a causa dell'effetto della rifrazione. La correzione permette di calcolare lo spostamento d dovuto alla rifrazione e la conseguente posizione di P' sul terreno a partire dall'angolo di off-nadir, da cui si calcola un primo orientamento che trascura la rifrazione e permette di stimare l'angolo di off-nadir con cui ogni punto terreno è rappresentato. Così, da P e P' è possibile calcolare le coordinate immagine di p e p' per stimare le componenti di correzione per rimuovere l'effetto di ciascun punto immagine e poter raffinare i parametri di orientamento.

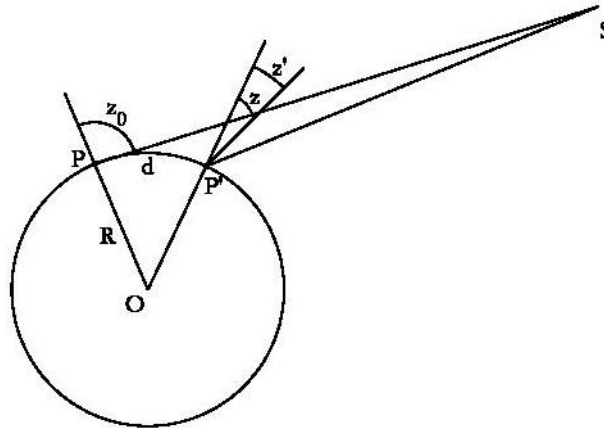


Figura 4-4 - Effetto della rifrazione atmosferica

La Tabella 4-1 mostra in conclusione l'ordine di grandezza dell'incurvamento dei raggi sul posizionamento di un punto a terra al variare dell'angolo zenitale (arrestato ad un valore di 50° , limite per le acquisizioni ad esempio di immagini IKONOS II).

Angolo zenitale non rifratto z_0 [°]	Angolo zenitale rifratto z' [°]	Rifrazione $z_0 - z'$ [°]	Spostamento per rifrazione d [m]
10	9.9971	0.0029	0.47
20	19.9939	0.0061	1.06
30	29.9904	0.0096	1.97
40	39.9860	0.0140	3.62
45	44.9834	0.0166	5.03
50	49.9802	0.0198	7.21

Tabella 4-1 - Effetto dell'incurvamento dei raggi, dovuto alla rifrazione atmosferica, sul posizionamento di un punto a terra in funzione dell'angolo zenitale

$$\begin{cases} \frac{x_I}{f} = \frac{R_{SS-SI,11}(X_T - X_S) + R_{SS-SI,12}(Y_T - Y_S) + R_{SS-SI,13}(Z_T - Z_S)}{R_{SS-SI,31}(X_T - X_S) + R_{SS-SI,32}(Y_T - Y_S) + R_{SS-SI,33}(Z_T - Z_S)} \\ \frac{y_I}{f} = \frac{R_{SS-SI,21}(X_T - X_S) + R_{SS-SI,22}(Y_T - Y_S) + R_{SS-SI,23}(Z_T - Z_S)}{R_{SS-SI,31}(X_T - X_S) + R_{SS-SI,32}(Y_T - Y_S) + R_{SS-SI,33}(Z_T - Z_S)} \end{cases}$$

che possono anche essere riscritte esplicitando alcuni dei parametri descritti in precedenza:

$$\begin{cases} \frac{x_I}{f} = tg\beta = \frac{d_p}{f} [J - int(J) - 0.5 - J_0 - k(I - I_0)] \\ \frac{y_I}{f} = tg\alpha = \frac{d_p}{f} \{(I - I_0) + d_L(I - I_0)^3 + k[J - int(J) - 0.5 - J_0]\} \end{cases}$$

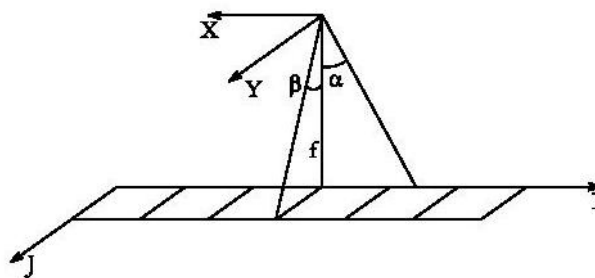


Figura 4-6 - Parametri per la scrittura delle equazioni di collinearità

Quindi tutti i parametri descritti in precedenza e che compaiono nella formulazione descritta devono essere introdotti a partire dai metadata ($a, i, \Omega, e, v, \omega, \varphi, \theta, \Psi, f, I_0$) oppure per semplicità posti pari a zero ($a_i, b_i, c_i, J_0, k, d_L$).

Le correzioni dei valori approssimati di tali parametri sono stimate basandosi su un congruo numero di GCPs, per i quali è appunto possibile scrivere le equazioni di collinearità, essendo di coordinate note a terra e facilmente riconoscibili sulle immagini. Poiché però il tempo di acquisizione è assai ridotto, l'orbita percorsa dal satellite nel frattempo è di poche decine di chilometri, per cui alcuni parametri kepleriani sono trascurabili (a, e, ω), mentre altri (i, Ω, T_p) sono correlati sia tra di loro che con l'assetto del sensore ed i parametri di orientamento interno e di auto calibrazione (f, I_0, J_0, k, d_L): i parametri effettivamente stimabili risultano quindi ($a_i, b_i, c_i, T_p, f, I_0, J_0, k, d_L$). Per ottimizzare dunque tale fase, controlli statistici possono essere introdotti per evitare instabilità dovuta ad eccessiva correlazione e calcolo di parametri non significativi. Con il metodo dei minimi quadrati è poi possibile stimare i parametri incogniti del modello per ricostruire la geometria di presa dopo aver opportunamente linearizzato le equazioni di collinearità, oltre a residui sui GCPs impiegati.

Nel caso di **immagini stereoscopiche**, il modello risulta nella sostanza invariato: è bene pre-elaborare le due immagini separatamente, tenendo in considerazione il fatto che solo se sono state acquisite in modalità in-track i parametri orbitali sono i medesimi. Dopo questo primo step, un affinamento con un block adjustment è necessario, valutando anche il possibile ricorso a Tie Points (punti omologhi riconosciuti esclusivamente sulle immagini, di cui non sono dunque note le

coordinate terreno) per irrigidire il modello: per ottenere le coordinate terreno di tali punti, dato che non si avrà una perfetta intersezione dei raggi omologhi, si identificano i due alla minima distanza, per poi mediane le coordinate.

4.3.2. Modello rigoroso per il satellite IKONOS II

A differenza delle altre ditte, Space Imaging non distribuisce i dati di calibrazione della camera, delle effemeridi precise e le immagini grezze acquisite dal satellite IKONOS II [18]: il prodotto base, definito Geo (Appendice II), è infatti pre-processato, vale a dire proiettato su un ellissoide gonfiato, e georeferenziato (è possibile attribuire coordinate cartografiche ad ogni punti immagine); le equazioni di collinearità non creano pertanto una corrispondenza tra punto terreno e punto sul piano immagine, ma quest'ultimo è sostituito da punti sull'ellissoide gonfiato. Come si vede infatti in Figura 4-7, ad ogni punto terreno corrisponde un punto sull'ellissoide gonfiato ed identificato dal raggio che collega satellite e punto terreno.

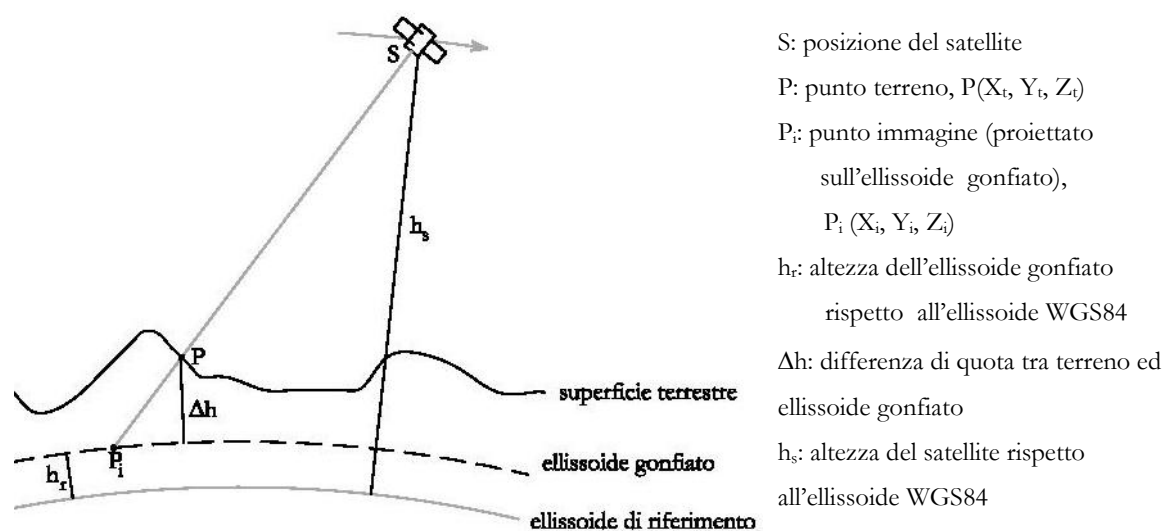


Figura 4-7 - IKONOS II: geometria di acquisizione ed ellissoide per la proiezione dell'immagine

Il file metadata fornito contiene 6 parametri, comunque collegati alle condizioni di acquisizione ed illuminazione della scena e che permettono di ricalcolare i parametri necessari alla costruzione del modello:

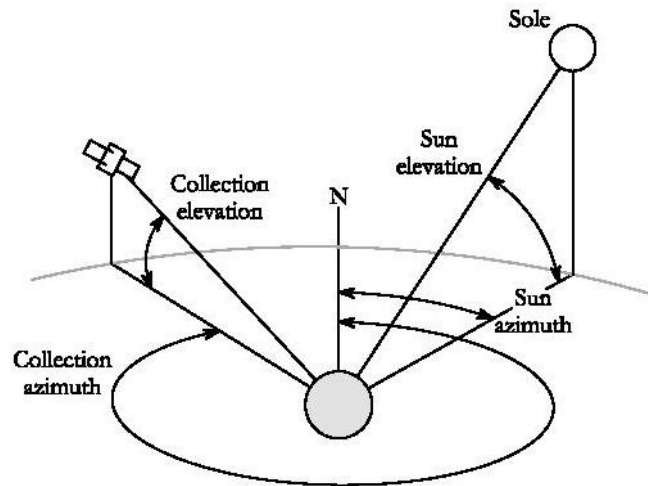


Figura 4-8 - IKONOS II: parametri forniti nel metadata file relativi a condizioni di acquisizione ed illuminazione.

- collection elevation: angolo tra l'orizzonte ed il satellite, è sempre maggiore di 40°.
- collection azimuth/sensor azimuth: misurato in senso orario da Nord, specifica la posizione del satellite in relazione all'area acquisita sulla Terra.
- sun elevation: angolo tra l'orizzonte ed il Sole, solitamente è maggiore di 15° e, dato che il satellite è eliosincrono, le immagini sono acquisite normalmente alle 10.30 a.m. locali.
- sun azimuth: misurato in senso orario da Nord, specifica la posizione del Sole sul piano orizzontale.
- scan azimuth: misurato in senso orario da Nord, specifica il punto di inizio dell'area di acquisizione.
- scan direction: forward se è da Sud a Nord, reverse da Nord a Sud (Figura 2-9).

Altro dato fondamentale per la corretta applicazione delle equazioni di collinearità sono le coordinate planimetriche dello spigolo in alto a sinistra dell'immagine, $A(N_A, E_A)$, contenute nel file .tfw fornito con essa; è così immediato ottenere le coordinate cartografiche nel sistema UTM WGS84 per tutti i punti immagine di coordinate $P(I,J)$, nota la dimensione p del pixel:

$$\begin{cases} N_P = N_A - Jp \\ E_P = E_A + Ip \end{cases}$$

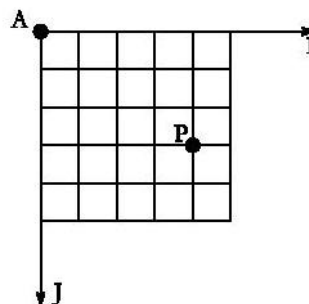


Figura 4-9 – Coordinate del generico punto immagine P espresse nel Sistema Immagine

Tali coordinate vengono poi trasformate in geografiche; le altezze ellissoidiche dei punti immagine sono quelle relative all'ellissoide gonfiato, il cui valore è riportato nel file metadata come *reference height*; è quindi possibile trasformare le coordinate nel sistema ECEF per poi implementarle.

Ultimo parametro che è necessario ricavare è la posizione del satellite: partendo dai valori di collection azimuth ed elevation riportati nel file metadata (dati medi per l'intera immagine), si possono calcolare le coordinate riferite al centro dell'immagine.

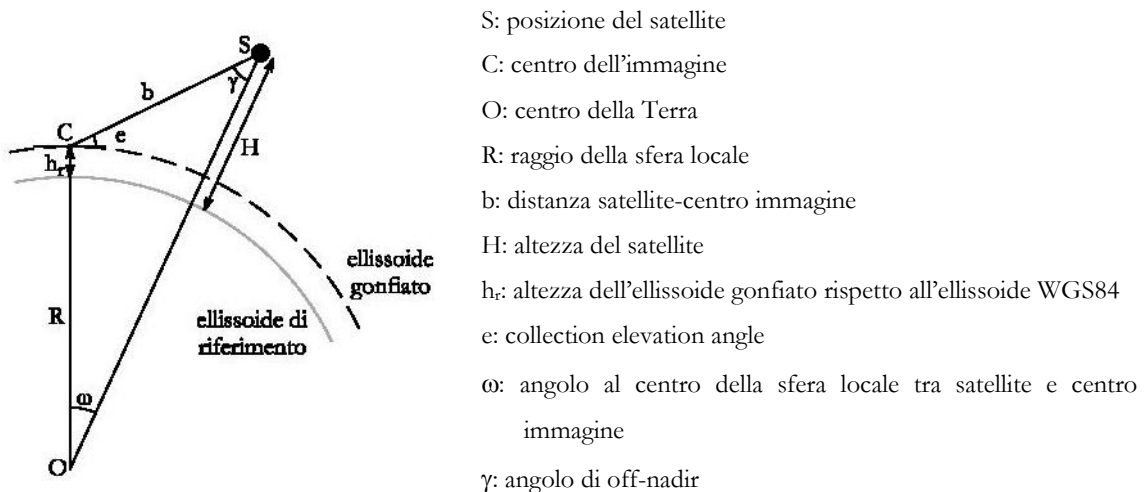


Figura 4-10 - IKONOS II: calcolo della posizione del satellite rispetto al centro dell'immagine

Applicando il teorema dei seni si ottiene:

$$\gamma = \arcsen\left(\frac{(R + h_r) \sin(e + \pi/2)}{R + H}\right) \quad e \quad b = \left(\frac{(R + h_r) \sin \omega}{\sin \gamma}\right)$$

da cui si ricavano le coordinate del satellite nel Sistema Geodetico Locale con origine nel centro dell'immagine:

$$\begin{cases} X_{S(C)} = b \cdot \cos e \cdot \sin \alpha \\ Y_{S(C)} = b \cdot \cos e \cdot \cos \alpha \\ Z_{S(C)} = b \cdot \sin e \end{cases}_{SL}$$

con α collection azimuth, che devono poi essere trasformate nel sistema ECEF.

$$\begin{bmatrix} X_{S(C)} \\ Y_{S(C)} \\ Z_{S(C)} \end{bmatrix}_{SG} = R_{SL-ECEF} \begin{bmatrix} X_{S(C)} \\ Y_{S(C)} \\ Z_{S(C)} \end{bmatrix}_{SL} + \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix}$$

con:

$R_{SL-ECEF}$: matrice di rotazione per il passaggio dal sistema geodetico locale a quello geocentrico

ECEF, funzione delle coordinate geografiche del centro immagine λ, φ ;

T_X, T_Y, T_Z : coordinate geografiche nel sistema ECEF del centro immagine.

Per calcolare poi la posizione del centro in corrispondenza di ogni punto di controllo bisogna innanzitutto esprimere le coordinate appena calcolate anche nel sistema orbitale (previa trasformazione da sistema ECEF ad ECI):

$$\begin{bmatrix} X_{S(C)} \\ Y_{S(C)} \\ Z_{S(C)} \end{bmatrix}_{SO} = R_{SO-SI} \begin{bmatrix} X_{S(C)} \\ Y_{S(C)} \\ Z_{S(C)} \end{bmatrix}_{SI}$$

con R_{SO-SI} per il passaggio dal sistema geocentrico inerziale a quello orbitale, è funzione dell'ascensione destra del nodo ascendente e dell'inclinazione orbitale: $R_{SO-SI} = R_X(i) \cdot R_Z(\Omega)$.

In particolare, i è nota e pari a 98.1° , mentre Ω deve essere preventivamente ricavato direttamente dalla terza equazione, in quanto, poiché $Z_S = 0$ per l'ipotesi di orbita kepleriana, delle due soluzioni dell'equazione di secondo grado che si ottiene solo una corrisponde ad un'orbita discendente (condizione tipica di acquisizione, §2.2) e dà quindi $X_{SO} < 0$.

Lo spostamento angolare relativo ad una riga di scansione conseguente al moto del satellite durante l'acquisizione può poi essere calcolato come:

$$\Delta\varepsilon = ATR / (R + h_r)$$

con ATR pari alla risoluzione along track.

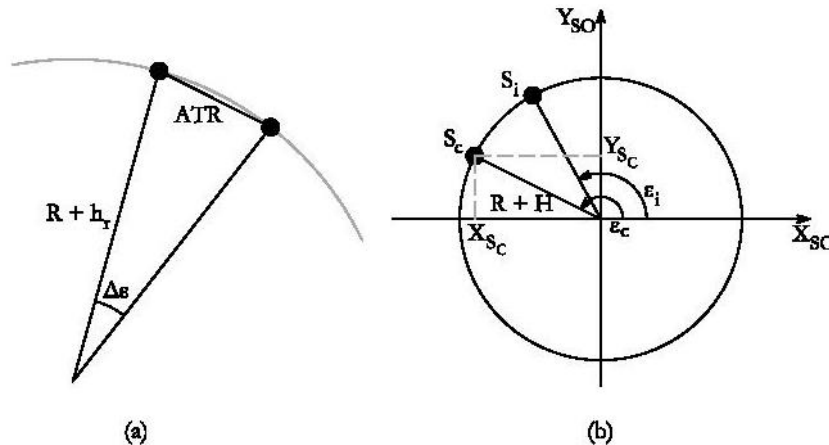


Figura 4-11 - IKONOS II: spostamento angolare relativo ad una riga di scansione (a); posizione del satellite nel sistema orbitale (b)

Considerando il piano XY nel sistema orbitale, per la posizione media del satellite si ottiene:

$$\varepsilon_c = \arctg \left(\frac{Y_{Sc}}{X_{Sc}} \right)$$

mentre per quelle delle righe di scansione in corrispondenza dei punti di controllo si ha:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_c - (J_{Sc} - J_{Si})\Delta\varepsilon$$

con J_{Sc} e J_{Si} righe di scansione del centro dell'immagine e delle righe dei punti di controllo; le coordinate del satellite nel sistema orbitale diventano dunque:

$$SO \begin{cases} X_{S_i} = (R + H) \cos \varepsilon_i \\ Y_{S_i} = (R + H) \sin \varepsilon_i \\ Z_{S_i} = 0 \end{cases}$$

che devono infine solo essere convertite nei sistemi ECI ed ECEF.

Ricavati tutti i valori approssimati dei parametri necessari, è quindi possibile, come visto al paragrafo precedente, impostare le equazioni di collinearità con un congruo numero di GCPs ed ottenere una stima con il criterio dei minimi quadrati.

4.3.3. Modelli razionali

Inizialmente usati dai tecnici dell'esercito statunitense, si sono poi ampiamente diffusi, tanto che anche le compagnie che gestiscono le piattaforme satellitari li usano per rendere disponibili i dati sulla geometria del sensore. L'ottimo livello di approssimazione di un modello rigoroso raggiunto permette infatti di non rilasciare né i parametri di orientamento interno ed esterno né i parametri fisici legati al processamento dell'immagine (proprio per questo sono definiti anche "metodi neri").

Inizialmente si utilizzavano metodi polinomiali costituiti da polinomi di ordine variabile 2D o 3D, ma queste relazioni non garantivano precisioni sufficienti. Si è pertanto sviluppato il metodo delle funzioni razionali (RPF, Rational Polynomial Function) in cui si utilizza un rapporto tra polinomi di ordine variabile per modellare la relazione tra coordinate a terra e coordinate immagine, costituendo di fatto una forma generica delle equazioni rigorose di collinearità.

Le coordinate immagine dei punti (i, j) vengono espresse come rapporti tra polinomi contenenti le coordinate a terra (latitudine λ , longitudine φ , altezza h):

$$i = \frac{P_1(\varphi, \lambda, h)}{P_2(\varphi, \lambda, h)} \quad j = \frac{P_3(\varphi, \lambda, h)}{P_4(\varphi, \lambda, h)}$$

in cui le coordinate sono solitamente normalizzate per evitare mal condizionamenti del problema dovuti ai differenti ordini di grandezza tra le coordinate terreno e quelle immagine e denormalizzate dopo il processo di stima per ottenere i valori finali. Le generiche relazioni adottate per ottenere il valore normalizzato sono del tipo:

$$\varphi_N = \frac{\varphi - \varphi_{offset}}{\varphi_{scale}}$$

$$\varphi = \varphi_N \cdot \varphi_{scale} + \varphi_{offset}$$

in maniera da ottenere valori compresi nell'intervallo $-1 \div 1$ o $0 \div 1$, con i parametri di normalizzazione φ_{scale} , φ_{offset} forniti nel file metadata.

L'ordine di tali rapporti è solitamente minore o uguale di 3: maggiore è il grado migliore è l'approssimazione del modello rigoroso, ma ordini superiori non migliorano sensibilmente i risultati a fronte dell'elevato numero di punti di appoggio a terra di coordinate note per identificare i valori di

tutti i coefficienti che compongono ciascun polinomio. Analiticamente, infatti, ogni polinomio è del tipo:

$$P = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} \varphi^i \lambda^j h^k =$$

$$= a_0 + a_1 h + a_2 \lambda + a_3 \varphi + a_4 h \lambda + a_5 h \varphi + a_6 \lambda \varphi + a_7 h^2 + a_8 \lambda^2 + a_9 \varphi^2 + a_{10} h \varphi \lambda + a_{11} h^2 \lambda + a_{12} h^2 \varphi + a_{13} \lambda^2 h + a_{14} \lambda^2 \varphi + a_{15} h \varphi^2 + a_{16} \lambda \varphi^2 + a_{17} h^3 + a_{18} \lambda^3 + a_{19} \varphi^3$$

dove gli a_{ijk} rappresentano i 20 coefficienti (RPCs, Rational Polynomial Coefficients) della funzione polinomiale.

Nonostante come si è detto tale metodo sia indipendente dalle caratteristiche fisiche del processo di acquisizione, è in realtà possibile stabilire un legame con i coefficienti dei diversi ordini del polinomio [53]:

- i termini di primo grado rappresentano distorsioni dovute alle proiezioni ottiche (traslazioni, rotazione, variazione di scala);
- i termini di secondo grado modellano correzioni collegate alla curvatura terrestre, alla rifrazione atmosferica, alla distorsione delle lenti (torsione e convessità dell'immagine acquisita);
- i termini di terzo grado sono infine relativi ad altri effetti incogniti ed a distorsioni più complesse.

Sostituendo quindi le funzioni polinomiali nelle relazioni per il calcolo delle coordinate, le RPF diventano:

$$i = \frac{(1 \ X \ Y \ \dots \ Z^2 Y \ \dots \ X^3)(a_0 \ a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{11} \ \dots \ a_{19})^T}{(1 \ X \ Y \ \dots \ Z^2 Y \ \dots \ X^3)(1 \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{11} \ \dots \ b_{19})^T}$$

$$j = \frac{(1 \ X \ Y \ \dots \ Z^2 Y \ \dots \ X^3)(c_0 \ c_1 \ c_2 \ \dots \ c_{11} \ \dots \ c_{19})^T}{(1 \ X \ Y \ \dots \ Z^2 Y \ \dots \ X^3)(1 \ d_1 \ d_2 \ \dots \ d_{11} \ \dots \ d_{19})^T}$$

in cui, per il fatto che il primo coefficiente a numeratore (a_0 , c_0) è indipendente dalle coordinate terreno ed il primo coefficiente a denominatore (b_0 , d_0) è solitamente posto pari ad 1, si hanno in tutto i seguenti coefficienti da determinare in funzione dell'ordine:

- 1° ordine: 7 coefficienti per ogni relazione, 4 al numeratore e 3 al denominatore;
- 2° ordine: 19 coefficienti per ogni relazione, 10 al numeratore e 9 al denominatore;
- 3° ordine: 39 coefficienti per ogni relazione, 20 al numeratore e 19 al denominatore.

Analogamente è possibile utilizzare le formule inverse, vale a dire per passare dalle coordinate immagine a quelle terreno, anche se raramente si ricorre a tale formulazione [60]. Le relazioni in tal caso diventano:

$$\varphi = \frac{P_1(i, j, h)}{P_2(i, j, h)} \qquad \lambda = \frac{P_3(i, j, h)}{P_4(i, j, h)}$$

Come descritto per i metodi rigorosi nel paragrafo precedente, disponendo di un numero sovrabbondante di GCPs, tutti i parametri delle equazioni descritte vengono stimati e raffinati usando il metodo dei minimi quadrati. Un'accurata analisi può inoltre migliorare la stima dei parametri identificando a priori quanti siano ridondanti (soprattutto quelli di ordine maggiore nel denominatore) [4][19].

Per ottenere un miglioramento della stima effettuata, la relazione che lega coordinate oggetto ed immagine può essere espressa nella forma [17][27]:

$$i = A_0 + IA_1 + JA_2 \frac{P_1(\varphi, \lambda, h)}{P_2(\varphi, \lambda, h)}$$

$$j = B_0 + JB_1 + IB_2 \frac{P_3(\varphi, \lambda, h)}{P_4(\varphi, \lambda, h)}$$

in cui i termini permettono una compensazione del bias derivante da traslazioni ed effetti di taglio:

- $A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2$ descrivono una trasformazione affine; tre punti sono sufficienti, ma è bene acquisirne di sovrabbondanti come controllo. In questo modo il parallelismo tra le linee e le distanze relative tra gli oggetti sono preservate, è possibile effettuare rotazioni, variazioni di scala, riposizionamenti ed applicare effetti di taglio, ma non rastremazioni e distorsioni prospettiche.
- A_0, A_1, B_0, B_1 modellano traslazioni ed effetti di taglio.
- A_0, B_0 modellano solamente la traslazione; un solo punto è necessario, ma almeno un secondo da usare come punto di controllo è consigliabile.

Correzioni di ordini superiori, che richiedono almeno sei GCPs, sono molto più sensibili alla distribuzione dei punti stessi e non apportano miglioramenti significativi dei risultati.

Questo affinamento si rende spesso necessario ad esempio a causa di piccoli errori di modellazione dei parametri di orientamento del sensore da parte dei gestori delle immagini durante la loro fase di pre-elaborazione: ciò, a causa del ridotto FOV, può comportare anche bias di alcuni metri (ovviamente variabili ed indipendenti per ogni immagine analizzata) cui è appunto possibile rimediare solitamente con semplici shift (spesso non è infatti necessario ricorrere alla trasformazione affine).

Nel caso in cui gli RPCs non siano forniti assieme alle immagini, si dispone di due metodi per estrarli:

- direttamente dai GCPs (*terrain dependent scenario*): in tal caso il numero di punti necessari è funzione dell'ordine del polinomio, per cui nel caso di un terzo ordine sono necessari almeno 39 punti, anche se solitamente meglio avere una ridondanza di circa il 20% per effettuare una migliore stima ai minimi quadrati. La stima ottenuta in questo caso può però non essere soddisfacente in quanto completamente dipendente dalle caratteristiche dell'area rilevata e dai GCPs, dunque assai sensibile ad eventuali outliers e tale da poter dare buoni risultati in prossimità dei punti ma comportare elevate distorsioni in zone lontane da essi [50][51].

Questa soluzione solitamente non è impiegata e, nel complesso, i valori ricavati non risultano più stabili e vantaggiosi rispetto a metodi più tradizionali quali le semplici funzioni polinomiali 2D e 3D.

- direttamente dal modello rigoroso del sensore (*terrain independent scenario*): in tale maniera la funzione polinomiale opera il miglior fitting possibile tra la griglia 2D dell'immagine ed una griglia 3D creata sull'oggetto ripreso: tale griglia, che planimetricamente ricopre l'intera area in esame, per la determinazione della quota si basa su griglie a differenti livelli ottenuti tagliando l'intero intervallo di quote della zona. In questo modo le coordinate planimetriche dell'oggetto sono calcolate a partire da un punto immagine (sulla griglia 2D) impiegando il modello rigoroso del sensore (le equazioni di collinearità risolte) per una quota specificata (intersecando dunque uno degli n strati della griglia 3D), poi gli RPCs sono calcolati mediante una soluzione ai minimi quadranti con input le coordinate immagine e quelle oggetto estratte dalla griglia. In questo caso i risultati sono migliori ma è necessaria la conoscenza dei parametri del sensore, ed è pertanto il metodo solitamente impiegato dai gestori delle piattaforme per generare i coefficienti distribuiti assieme alle immagini (in questo caso si parla solitamente di "metodi grigi"). L'accuratezza ottenuta, pari ad alcuni metri, deve comunque essere migliorata con l'impiego di alcuni GCPs durante il processo di elaborazione eseguito dall'utente finale.

In relazione a quest'ultimo approccio, diverso è, ad esempio, lo standard adottato dalle due principali ditte: SpaceImaging (IKONOS II, GeoEye-1), e DigitalGlobe (QuickBird, WorldView-1). Nel primo caso l'utente non può impiegare direttamente un modello rigoroso, sviluppato dalla ditta per creare RPC forniti insieme alle immagini e comunque applicato senza l'impiego di GCPs, necessitando dunque di un raffinamento per eliminare effetti di bias che riducono l'accuratezza di georeferenziazione dei dati forniti (sono di solito sufficienti due traslazioni).

Al contrario, DigitalGlobe ha fornito le caratteristiche del proprio sensore alle principali ditte di software, che hanno potuto implementare il modello per l'ortorettificazione delle immagini, fornite con informazioni aggiuntive sull'orbita e comunque con gli RPC per l'uso anche di metodi polinomiali. In conclusione va comunque ricordato che, in relazione a possibili spostamenti dei sensori conseguenti al lancio (§2.3), solitamente i coefficienti sono calcolati per l'intera immagine costituita dalla "linea virtuale" dei sensori affiancati, pertanto le deformazioni del singolo CCD non sono modellate e possono dunque generare difetti e cali della precisione ottenibile [5].

Anche applicando modelli razionali è possibile l'orientamento di stereocoppie: in questo caso si ricorre all'impiego della Direct Linear Transformation (DLT) con almeno 6 GCPs per calcolare i parametri che servono all'identificazione delle coordinate terreno approssimate dei TPs, in modo da poter poi linearizzare le equazioni e stimare la soluzione sempre con il metodo dei minimi quadrati.

Nonostante il progressivo abbandono dei modelli polinomiali ed il raffinamento di quelli razionali, i principali svantaggi legati a tale metodo sono:

- necessità di un elevato numero di GCPs nel caso non siano forniti gli RPC da raffinare;
- importanza della distribuzione dei GCPs;
- possibili distorsioni in aree lontane dai GCPs;
- elevata sensibilità agli outliers;
- incapacità di modellare le distorsioni locali.

Proprio per questo, solitamente, per ottenere accuratissime è preferibile ricorrere ai modelli rigorosi; buoni risultati, tuttavia, sono ottenibili mediante le RFM anche con un ridotto numero di GCPs in terreni pianeggianti.

4.3.4. Valutazione dell'accuratezza

Come accennato al paragrafo 3.4, prima di procedere con l'elaborazione, è necessario un primo controllo sulla qualità delle correzioni apportate. Il parametro statistico impiegato per la valutazione è il Root Mean Square Error (RMSE), pari a:

$$RMSE = \sqrt{\bar{X}^2 + \sigma^2} [m]$$

con:

\bar{X} : media dei residui [m];

σ : deviazione standard [m].

Per eseguire tali controlli, come descritto al paragrafo 4.2, oltre ai GCPs è bene disporre anche di CPs per valutare gli scostamenti fra le coordinate note e quelle ricavate dall'implementazione del modello. In particolare, i residui relativi ai GCPs consentono di valutare l'accuratezza della modellazione, mentre quelli sui CPs riflettono l'accuratezza finale: errori sui GCPs (calcolo delle coordinate terreno o riconoscimento sulle immagini) comporteranno un'errata esecuzione dell'orientamento (visibile con un aumento generalizzato dei residui), mentre errori analoghi sui CPs innalzeranno solo i residui su questi ultimi ma l'accuratezza finale del modello sarà comunque maggiore. Proprio per ottenere risultati significativi, si devono evitare campioni ridotti di punti: orientamenti eseguiti con pochi GCPs potrebbero generare RMSE eccessivamente ridotti (il modello approssima molto bene tali punti, per cui si rischia di sovrastimare la precisione, ma può generare elevate distorsioni altrove, sottostimando l'accuratezza reale ottenibile), così come pochi CPs rendono statisticamente poco significativo il confronto.

Da non sottovalutare in tale fase sono le condizioni di presa delle immagini, poiché la precisione intrinseca dei punti è dipendente anche dall'angolo di off nadir medio dell'immagine, con un calo sensibile al suo aumentare.

Diversi sono i metodi applicabili, tutti tipicamente generali e pertanto validi con qualunque software utilizzato per l'elaborazione; tra i più usati si hanno [13]:

1. *Hold Out Validation (HOV)*: i punti di entrambi i set devono essere ben distribuiti sull'immagine ed in numero paragonabile. Il principale svantaggio è la totale dipendenza dai punti impiegati come CPs: come appena descritto, se si hanno outliers o comunque punti rilevati di scarsa accuratezza, il valore finale di RMSE è affetto da bias, oppure se i punti sono pochi il controllo risulta non attendibile.
2. *Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV)*: è un caso particolare del metodo generale *k-fold cross validation*, in cui il set di dati iniziale è suddiviso in k sottogruppi all'incirca delle stesse dimensioni. Il modello è poi eseguito k volte, impiegando ogni volta un sottogruppo diverso come test set e gli altri come dati da elaborare. L'accuratezza complessiva è ottenuta mediando i valori calcolati su ogni sottogruppo. Nel caso specifico si ha $k = \text{numero GCPs}$, con ogni sottogruppo composto da un solo GCP: vengono quindi usati come GCPs tutti i punti meno uno, impiegato invece come CPs, variandolo ovviamente ad ogni iterazione. Ad ogni step si calcola anche il residuo tra le coordinate calcolate per il CP e quelle note, per cui il parametro di validazione finale è ancora il RMSE o un parametro più robusto quale il *median Absolute Deviation (mAD)* degli errori su tutte le iterazioni, che permette l'identificazione dei punti critici, tipicamente quelli con residuo superiore a 3 volte il mAD. In tal modo tutti i punti sono usati sia come GCPs che come CPs, evitando dunque la dipendenza del risultato dal solo set di CPs o da eventuali outliers e risultando perciò un metodo più robusto.

Un confronto tra i due metodi [9][23] ha in generale mostrato una buona corrispondenza tra i risultati ottenuti con ambedue le procedure confrontando CPs in aree simili: deve infatti essere ben valutato se gli indici del metodo LOOCV sono paragonabili a quelli HOV in relazione alle diverse distribuzioni impiegate come GCPs e CPs nei differenti test. Con la procedura LOOCV si impiega ogni volta un GCP in meno, per cui in alcuni casi l'area complessiva da essi coperta può risultare sensibilmente inferiore all'intero set usato con il metodo HOV; in aggiunta, nella medesima condizione il CP si viene a trovare in una zona marginale rispetto ai GCPs, con la possibilità quindi di avere residui maggiori (che influenzano il RMSE ma non il mAD). Ulteriori test hanno mostrato la maggior robustezza del parametro mAD rispetto al RMSE per il metodo LOOCV andando a paragonare i risultati con set composti da un GCP in meno anche per il metodo HOV.

3. *Test di robustezza del modello [23]*: è volto a valutare le variazioni di accuratezza quando si hanno uno o più outliers all'interno del set di GCPs. È sufficiente aggiungere un errore fittizio di entità pari a 4÷5 volte il valore del RMSE alle coordinate di un GCP; eseguiti nuovamente i test di orientamento, oltre al solito parametro RMSE è possibile valutare anche il residuo globale normalizzato:

$$ResN = \text{residuo} / RMSE$$

Prove eseguite con entrambi i modelli mostrano come con gli RPCs si abbiano problemi, mentre al contrario il metodo rigoroso riesce ad identificare gli outliers senza peggiorare eccessivamente l'ortorettifica. In quest'ultimo caso, infatti, i residui sui GCPs tendono a crescere, ma esaminando il residuo massimo si identifica chiaramente il punto errato; se però i GCPs sovrabbondanti sono pochi si ha una piccola propagazione dell'errore su tutto il modello, con un aumento dei residui riscontrabile anche nei CPs [55].

4. *Valutazione della stabilizzazione della precisione:* analizzando i valori di RMSE ottenuti implementando il modello con un diverso numero di GCPs, è possibile avere indicazioni generali sull'accuratezza ottenibile e valutare il numero minimo di GCPs che permette di ottenere tale valore: infatti, in funzione del GSD e dell'angolo di off nadir, la precisione del modello (valutabile dal RMSE sui GCPs) cresce via via che i GCPs stessi aumentano fino ad un massimo, oltre cui l'aggiunta di altri punti non comporta significativi miglioramenti. Si può a tal fine impiegare il RMSE dei CPs per identificare la curva esponenziale decrescente che meglio li approssima:

$$y = ae^{bx^{-t}}$$

con:

y è il RMSE dei CPs;

x il numero di GCPs;

a, b stimati mediante le deviazioni standard σ_a, σ_b con stima ai minimi quadrati;

t è un intero positivo che si calcola in modo iterativo a partire da $t=1$ grazie alla stima del valore asintotico a e di b : se, in corrispondenza della metà dei GCPs a disposizione, la differenza tra a e y è maggiore di una data soglia funzione del GSD delle immagini, t è incrementato di un'unità e si stimano nuovamente a e b , altrimenti ($a + 2\sigma_a$) consente di ricavare il numero minimo di GCPs (\tilde{n}_{GCP}) come intero superiore del valore di x corrispondente ad $y = a + 2\sigma_a$:

$$\tilde{n}_{GCP} = \text{int sup} \sqrt[t]{b / \ln(a + 2\sigma_a) - \ln a}$$

Nel caso si sia impiegato il metodo LOOCV, il valore di t deve però essere stimato in corrispondenza del numero totale di GCPs meno uno: $x = (n_{GCP} - 1)/2$.

Un metodo analogo [2] consente di ricavare il numero minimo di GCPs partendo sempre dai valori di RMSE per le coordinate planimetriche dei GCPs stessi. È infatti possibile individuare mediante una procedura iterativa una retta con ordinata costante nel piano cartesiano in cui si riportano i residui stessi (in ascissa si ha il numero di GCPs impiegati, in ordinata i relativi RMSEs). Il primo valore di tentativo per l'ordinata costante è dato dalla media dei residui degli ultimi 2 o 3 test eseguiti: se, con una tolleranza pari a 2σ , non si hanno outliers, si inserisce un altro residuo e si riesegue il controllo; si procede iterativamente fino all'esclusione del primo

punto, che permette di identificare il valore della precisione intrinseca (e dunque dell'ordinata costante) pari al RMSE del passo precedente. Eseguendo il calcolo separatamente per la coordinata Nord ed Est, il più grande dei due valori rappresenta il valore minimo di GCPs col quale si ha l'assestamento dell'accuratezza.

Tipicamente 3÷5 punti sono sufficienti impiegando RFM con RPC forniti nei metadati (è necessario come visto calcolare la traslazione o la trasformazione affine per raffinare l'orientamento), mentre ne occorrono 8÷15 impiegando modelli rigorosi (in funzione del tipo di sensore e del tipo di immagine) [13] ma tale numero è comunque variabile per ogni immagine in funzione dell'estensione e della morfologia del terreno.

5. *Incertezza di collimazione dei punti sulle immagini [1]*: utile per evitare errori grossolani o sistematici di individuazione dei punti che possono inficiare la bontà dell'orientamento. A tal proposito, più operatori possono eseguire l'operazione di riconoscimento di tutti i punti (GCPs, CPs, e TPs), confrontando poi separatamente gli scarti quadratici medi di collimazione delle coordinate immagine e ritenendo outliers quelli aventi residuo superiore al doppio dei valori medi ottenuti; ricollimando od eliminando tali punti è possibile giungere a scarti quadratici finali medi dell'ordine di 1/3 di pixel, garantendo così un errore massimo inferiore ad un pixel col 90% di probabilità.

4.4. *Correzione radiometrica*

Consente di rimediare alle distorsioni nel segnale durante l'acquisizione derivanti sia da malfunzionamenti del sensore che da condizioni esterne (illuminazione e condizioni atmosferiche).

Le principali problematiche da affrontare riguardano:

- *equalizzazione della risposta dei detector*: poiché i singoli rilevatori che costituiscono il sensore possono subire variazioni termiche o delle proprietà dei materiali che li compongono, l'invio dei dati potrebbe subire ripercussioni, riscontrabili in effetti di rigatura (ovviamente meglio identificabili su superfici omogenee). E' possibile rimediare a tale inconveniente tramite i dati di calibrazione di bordo del sensore o mediante un approccio statistico.
- *effetto di riga saltata*: può riguardare intere righe (nere o grigio uniforme) o pixel isolati con valori fuori scala, ed è dovuto solitamente a cadute di tensione o perdite di segnale nella catena elettronica del sistema. Per rimediare si ricorre alla sostituzione delle righe intere con quella precedente o seguente o con la loro media, oppure si applicano filtri mediani per la correzione di pixel isolati.
- *striping*: deriva da problemi sulla risposta di singoli detector dell'array, e fa sì che valori omogenei di luminosità siano registrati in modo differente, rendendo quindi necessaria una correzione relativa per questi detector in modo da uniformare i valori di radianza in tali aree.

- condizioni di illuminazione: l'acquisizione di un'area in momenti diversi della giornata o dell'anno comporta una differente illuminazione della scena ripresa, cui si rimedia con una normalizzazione dei valori rispetto alle distanze tra area acquisita, posizione del Sole e posizione del sensore e dell'angolo zenitale del Sole. Tale problema è spesso presente anche nel caso la scena sia di notevole estensione e sia dunque necessario creare un mosaico delle singole porzioni acquisite dal sensore.
- diffusione atmosferica (scattering): è il principale effetto causato dall'attraversamento dell'atmosfera da parte della radiazione elettromagnetica, e si manifesta con un aumento dei valori di radianza misurati. È infatti possibile notarlo analizzando i valori di radianza di zone in ombra o di oggetti scuri (quali grandi masse d'acqua), che ovviamente dovrebbero essere pari a zero o ad esso molto prossimi; in caso di differenze più marcate si può quindi sottrarre il valore minimo ritrovato in tali aree in tutta l'immagine, ripetendo l'analisi per ogni banda acquisita.
- saturazione del segnale: dovuto ad oggetti altamente riflettenti, con ripercussioni (effetto di spilling) anche sui pixel adiacenti;
- movimento degli oggetti: si notano pattern colorati alle spalle degli oggetti confrontando le immagini pancromatiche e multispettrali (visibile per IKONOS II specialmente nella banda Blu e dovuto sia allo shift di 0.5s tra l'acquisizione pancromatica e quella multispettrale che ad una non perfetta correzione della nitidezza). Ciò comporta ovviamente maggiori problemi eseguendo un Pan-sharpening delle diverse bande (§4.5.2)

Come anticipato nel paragrafo 2.3, la tecnologia TDI impiegata su diversi sensori CCD comporta la generazione di immagini con un generale effetto di smoothing. Metodologie impiegate per rimediare a tali problemi quali la Modulation Transfer Function Compensation (MTFC) rendono nuovamente più nitide le immagini, generando però una riduzione del contrasto ed altri effetti quali lo striping; analogamente, il Dynamic Range Adjustment (DRA) permette una miglior distribuzione dei valori di radianza sull'intero intervallo ad 11bit disponibile per l'acquisizione nella maggior parte dei sensori, alterando però in modo irreversibile l'accuratezza radiometrica assoluta dell'immagine.

4.5. Estrazione del modello

Terminata dunque la fase di correzione ed orientamento dell'immagine, è necessario identificare i punti corrispondenti sulle due immagini per poter ottenere le coordinate terreno del punto rappresentato (image matching). Ovviamente tale fase si basa sull'analisi delle differenze tra possibili targets ed oggetti circostanti. Elementi che devono quindi essere valutati risultano essere:

- il tono (relativo alla variazione di luminosità ed al colore degli oggetti);
- la forma;
- la dimensione;
- il pattern (relativo alla disposizione spaziale degli oggetti distinguibili sull'immagine);

- la *texture* (relativa alla disposizione ed alla frequenza nelle variazioni di tono nelle diverse zone dell'immagine);
- l'*ombra* (utile nell'interpretare profili ed altezze degli oggetti ma ovviamente causa di perdita di dettagli nella propria zona di influenza);
- l'*associazione* (lega il singolo target ad altri elementi distinguibili nelle sue vicinanze).

Lo sviluppo tecnologico ha ormai permesso di eliminare l'intervento dell'operatore in tale fase, in quanto sono stati sviluppati diversi algoritmi di autocorrelazione basati sul riconoscimento automatico di forme o segnali sulle due immagini a disposizione.

Le tecniche principali di correlazione sono:

- analisi dei valori radiometrici di ciascun pixel;
- riconoscimento di primitive geometriche semplici (punti, linee, aree);
- riconoscimento di entità differenti;
- ricerca ed impiego di relazioni spaziali sulle diverse primitive presenti nelle immagini.

Per cui, in funzione della sorgente del dato impiegata, diverso è il metodo di correlazione impiegato:

- *Area Based Matching (ABM)*, in cui la sorgente di informazioni è composta da una piccola finestra con i valori di radianza dell'immagine. Permette il raggiungimento di precisione sub-pixel, ma è sensibile a false correlazioni (quali variazioni di ombra e posizione del medesimo oggetto nella coppia stereoscopica) per cui necessita di una buona approssimazione dei dati di input.
- *Feature Based Matching (FBM)*, in cui le primitive sono elementi facilmente riconoscibili nelle immagini quali ad esempio angoli, bordi, Tali elementi sono riconosciuti da diversi operatori matematici e lo schema dei punti creato è confrontato tra le diverse immagini (il processo è semplificato se l'orientamento esterno delle immagini è noto). Grazie a pre-trattamenti delle immagini (identificazione di vari livelli di soglia locali per i valori di radianza nella fase di identificazione delle features) sono normalmente più stabili rispetto ai precedenti. Di contro, differenti deformazioni geometriche di elementi corrispondenti, perdita di informazione durante il pre-trattamento (che non vengono più recuperate) e scarsità di features in aree omogenee riducono nel complesso l'accuratezza finale ottenibile.
- *Matching relazionale*, in cui ci si basa su vari tipi di relazione tra elementi delle immagini (geometrica, combinazione di primitive, ...). Solitamente non sono molto accurati, ma comunque robusti e non necessitano di una buona approssimazione iniziale dei dati di ricerca.

Il **metodo ABM** è il più impiegato dei tre, e si basa su un confronto statistico delle intensità di livello di grigio di ciascun pixel immagine (Digital Number). Su ogni immagine è identificata una finestra: in un'immagine tale area è tenuta fissa (template), mentre sull'altra viene fatta scorrere su tutta l'area (search window) in maniera da identificare la zona che più assomiglia al template tramite il

soddisfacimento di un determinato criterio, vincolando però all'intero pixel la massima precisione raggiungibile. La finestra di ricerca può anche essere di dimensioni superiori al template, in modo da permettere l'identificazione di piccoli spostamenti degli oggetti corrispondenti dovuti alla diversa inclinazione delle immagini, evitando però dimensioni troppo elevate che potrebbero generare false corrispondenze nel caso di oggetti ripetuti.

Il criterio di valutazione può essere espresso dalla massima correlazione tra le due aree selezionate (Cross Correlation), espressa dalla relazione $r = \sigma_{12} / \sigma_1 \sigma_2$ che rapporta gli scarti quadratici medi dei valori delle due matrici (template e finestra di ricerca) alla rispettiva covarianza; introducendo le funzioni dei livelli di grigio la relazione diviene:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (g_{1i} - \bar{g}_1) \cdot (g_{2i} - \bar{g}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (g_{1i} - \bar{g}_1)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (g_{2i} - \bar{g}_2)^2}}$$

con:

g_{1i}, g_{2i} : livello di grigio nel punto i rispettivamente per la matrice template e per quella di ricerca;

\bar{g}_1, \bar{g}_2 : media aritmetica dei livelli di grigio rispettivamente per la matrice template e per quella di ricerca.

Ovviamente la variazione delle dimensioni della finestra comporta risultati differenti, tipicamente dipendenti dalla morfologia della zona (in termini di shift tra elementi corrispondenti), dalla percentuale di matching ottenuto, dall'errore di correlazione, dalla velocità della procedura: tutti tali fattori devono essere opportunamente valutati nel singolo caso, in funzione principalmente della risoluzione spaziale dell'immagine e della morfologia dell'area acquisita.

Il problema principale di tale metodo è rappresentato da possibili errori di matching dovuti principalmente ad aree omogenee o ad elementi ripetuti, in quanto la procedura non è in grado di risolvere l'ambiguità trovata tra più zone con possibili corrispondenze con elevati coefficienti di correlazione molto simili tra loro.

Un altro problema è costituito dalla validità del coefficiente di corrispondenza tra gli elementi contenuti nelle due finestre solo nel caso di prese normali e terreno orizzontale; al contrario, esso si riduce ad una sola approssimazione nel caso di distorsioni e rotazioni. Per ottenere dunque valori di precisione ugualmente corretti e migliori del pixel è possibile ricorrere alla tecnica del Least Square Matching, che considera appunto anche distorsioni radiometriche e geometriche esistenti tra template e finestra di ricerca, sempre presenti in quanto il medesimo oggetto è ripreso da punti di vista differenti. Utilizzando porzioni di immagine sufficientemente piccole, la variazione radiometrica può essere assunta lineare mentre quella geometrica modellabile da una trasformazione affine, introducendo quindi otto parametri (2+6) da stimare con una soluzione ai minimi quadrati.

Ragionando su un caso bidimensionale, la relazione teorica:

$$r = g_1(x, y) = g_2(x, y)$$

che prevede l'uguaglianza delle funzioni dei livelli di grigio in un dato punto su entrambe le finestre, diventa:

$$g_1(x, y) = f[g_2(u, v)]$$

a causa delle distorsioni radiometriche e geometriche (con $u = u(x, y)$ e $v = v(x, y)$). La componente radiometrica può essere corretta tramite una traslazione radiometrica s ed un fattore moltiplicativo dei valori dei livelli di grigio g , mentre per quella geometrica si può applicare una trasformazione affine a sei parametri tra le due finestre, per cui:

$$u = ax + by + c \quad \text{e} \quad v = dx + ey + f$$

e dunque la relazione finale del confronto tra template e finestra di ricerca diviene:

$$g_1(x, y) = g \cdot g_2(ax + by + c + dx + ey + f) + s$$

Tale procedura è iterativa, e per ottenere un buon calcolo della correlazione si necessita di valori approssimati della posizione della matrice di ricerca di elevata precisione (pari a circa 2 pixel).

Per ottimizzare i risultati le due procedure sono quindi spesso applicate assieme, prima la Cross Correlation per ottenere una precisione dell'ordine del pixel sulla posizione dei punti, poi il Least Square Matching che permette di ottenere precisioni in alcuni casi anche di 0.1-0.2 pixel.

In aggiunta si ricorre solitamente all'impiego della geometria epipolare, secondo la quale i fotogrammi giacciono sul medesimo piano ed hanno in comune l'orientamento lungo l'asse X, per cui i punti omologhi sono ricercabili lungo linee (dette appunto epipolari): poiché nella realtà tale condizione non si verifica, partendo dai parametri di orientamento la si può imporre in maniera da effettuare la ricerca solamente lungo rette, velocizzando la fase di matching e riducendo i rischi d'errore nel riconoscimento di punti omologhi.

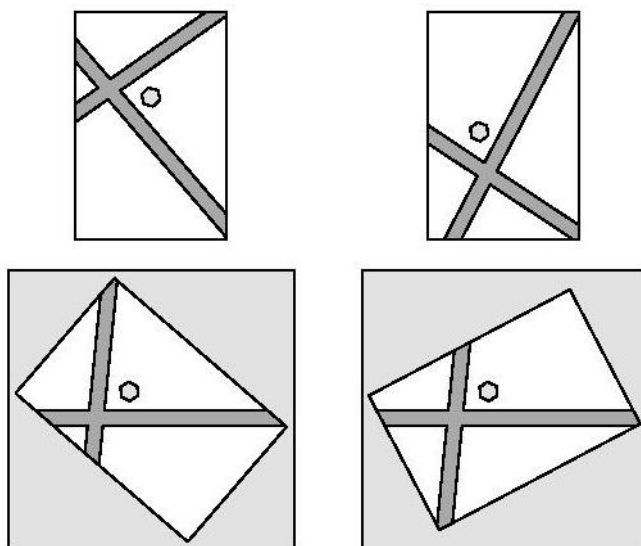


Figura 4-12 - Creazione delle immagini epipolari

In questo caso quindi la Cross Correlation permette quindi di eseguire il matching ed identificare la parallasse d'altezza. Sono infatti calcolati i coefficienti, nel range $0 \div 1$ per ogni pixel, che consentono poi la costruzione di una superficie di secondo ordine basata sui punti con correlazione prossima ad 1 in modo da identificare con precisione sub-pixel la posizione corretta dei punti stessi. La differenza di posizione tra centro della finestra template e posizione identificata con la superficie

determina la parallasse dovuta alla quota terreno (o disparità: variazione di posizione di un oggetto nella direzione di volo derivante dal movimento della piattaforma), da cui calcolare infine la quota assoluta. La parallasse è pertanto data dalla relazione:

$$p = f \frac{B}{(H - \Delta h)}$$

con:

f: focale del sensore;

H: quota di volo del sensore;

Δh : altezza dell'oggetto;

B: baseline, distanza tra i centri di acquisizione delle due immagini.

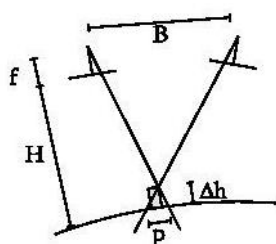


Figura 4-13 - Parallasse d'altezza

Metodologia simile è il **region growing**, che però è indipendente dalla geometria dell'immagine e dalle informazioni sull'orientamento esterno. Esso necessita di alcuni punti corrispondenti (solitamente quelli impiegati nella fase di orientamento sono sufficienti) impiegati come punti di partenza per la ricerca, che si estende progressivamente in tutte le direzioni (non serve quindi ricorrere alla geometria epipolare). Anche in questo caso, basandosi sempre sul coefficiente di correlazione, si procede poi al riconoscimento dei punti omologhi muovendo la finestra template e quella di ricerca sulle due immagini. Valgono quindi le stesse considerazioni relative alla dimensione delle finestre e sulla necessità di affinare la ricerca con un matching ai minimi quadrati che tenga conto delle distorsioni dovute alla geometria di presa.

Riassumendo, quindi, il processo di autocorrelazione si compone delle seguenti fasi:

- scelta, in un'immagine, delle entità su cui effettuare la correlazione: tramite operatori di interesse si identificano secondo appositi criteri i punti più adatti alla fase di correlazione (solitamente punti e linee).
- identificazione della medesima identità sull'altra immagine: tale ricerca è velocizzata dall'impiego della scomposizione piramidale delle immagini, che comporta un ricampionamento di più immagini a risoluzione ottica via via inferiore. In modo gerarchico si inizia un processo iterativo dalle immagini a risoluzione inferiore in modo da identificare solo le caratteristiche principali del territorio e dunque limitare la ricerca in intorni vicini alle

coordinate identificate nello step precedente, terminando quando la ricerca avviene sull'immagine di partenza.

- calcolo della posizione nello spazio del punto considerato: effettuato con le procedure descritte in precedenza.
- analisi della qualità della correlazione: si analizza l'indice di correlazione, anche se un elevato valore non garantisce l'esecuzione di un matching corretto. Errori quali quelli dovuti a brusche variazioni di illuminazione a causa di variazioni di quota del terreno possono essere contenuti inserendo diverse decine di TPs proprio in tali aree per vincolare maggiormente il matching. Analogamente, anche il numero di GCPs impiegati può influenzare la qualità del matching, soprattutto in funzione dell'area da essi coperti con particolare riferimento alle zone di bordo delle immagini. [3].
- calcolo delle coordinate terreno dei punti risolvendo ai minimi quadrati le intersezioni dei raggi omologhi nello spazio: una volta identificati tutti i punti omologhi nelle due immagini, ciò è possibile grazie ai dati sull'orientamento ottenuti dall'applicazione del modello stereoscopico.
- estrazione di una griglia regolare (grid), interpolando i dati così ricavati come descritto nel paragrafo 3.3.1. Il passo di generazione è ovviamente funzione del GSD delle immagini di partenza, in generale comunque si impiega un passo pari a 2÷3 volte il GSD stesso [13].

Un diverso approccio, sempre basato su più passaggi interconnessi, è volto a fondere le due principali metodologie di matching descritte e si basa sui seguenti step [5]:

- pre-processamento delle immagini, con creazione delle immagini piramidali al fine di velocizzare la procedura.
- Multiple Primitive Multi-image matching (matching MPM), eseguito per ogni livello della piramide, è basato sulla ricerca di punti (sparsi o in griglia) e di bordi omologhi; il vantaggio è l'utilizzo di una corrispondenza oggetto-immagine (e non la classica immagine-immagine), in cui il matching è guidato dallo spazio oggetto e permette di ricostruire il singolo elemento contemporaneamente in tutte le immagini a disposizione, senza quindi dover lavorare sulle singole stereocoppie per poi unire i risultati. In aggiunta, si sono fuse tutte le metodologie di matching, impiegando informazioni sia locali che globali delle immagini, dunque instaurando relazioni che permettono poi di eseguire sia i matching area che feature based. In tal modo il riconoscimento dei bordi consente di riconoscere e conservare le discontinuità presenti sulle immagini, mentre i punti sono utili nelle aree con texture ridotta.
- costruzione di un TIN: tutti gli elementi identificati portano alla fine di ogni livello ad una prima modellazione. Il TIN è l'elemento più adatto alla descrizione del terreno in quanto unisce tutti gli elementi identificati senza alcuna interpolazione, ed è impiegato nel successivo livello di raffinamento del matching per la determinazione di alcuni parametri approssimati

che lo guidano (dimensione della finestra di correlazione, raggio di ricerca, valori di soglia per i coefficienti di correlazione): questo favorisce ulteriormente la qualità globale riducendo la possibilità di errori negli step successivi. La possibilità di avere un'elevata ridondanza di informazioni (grazie al matching MPM) consente di descrivere in modo accurato anche terreni irregolari e con forti pendenze, consentendo anche una miglior identificazione di eventuali outliers, solitamente eseguita confrontando le informazioni estratte con quelle presenti in un piccolo intorno.

- raffinamento del matching precedente, con procedura ai minimi quadrati, che permette il raggiungimento di accuratèzze sub-pixel e l'ulteriore determinazione di blunders.
- valutazione dell'elaborazione del sistema.
- creazione del grigliato regolare.

4.5.1. *Image enhancement*

Correzione geometrica (§4.3) e radiometrica (§4.4) sono come visto necessarie e fondamentali per una corretta elaborazione delle immagini acquisite; per rendere più agevole la fase di interpretazione e matching può in certi casi risultare utile cercare di migliorare ulteriormente l'aspetto delle immagini, modificando in modo opportuno i valori di radianza contenuti in ciascun pixel. Le correzioni radiometriche apportate prima di fornire il dato all'utente correggono infatti tutti i problemi esclusivamente tecnici che caratterizzano il dato grezzo: nella maggior parte dei casi si ha però a che fare con scene in cui le differenze energetiche tra oggetti e sfondo sono molto marcate, per cui è difficile disporre già del corretto contrasto ed intervallo di luminosità sull'intera immagine. Due sono quindi le metodologie adottabili:

- l'analisi dell'istogramma di frequenza per ottimizzare il contrasto (rapporto tra luminosità massima e minima nell'immagine) aumentando le variazioni di tono globalmente o solo di alcuni oggetti (caratterizzati da un ben determinato intervallo sull'istogramma). Bisogna infatti sottolineare che, seppur progettati per acquisire immagini solitamente ad 11bit, in realtà gli istogrammi di frequenza delle immagini mostrano spesso picchi concentrati in zone ridotte dello spettro, tendenzialmente nelle zone più scure (la risoluzione maggiore offre vantaggi in casi estremi, quali tetti molto riflettenti accanto a zone in ombra).
- il filtraggio spaziale, utile per enfatizzare o ridurre specifici elementi nella scena. La procedura si basa sulla frequenza spaziale, concetto legato a quello di texture, che distingue aree con brusche variazioni tonali (forti frequenze spaziali) ed aree con variazioni ridotte e progressive (bassa frequenza spaziale). Il filtraggio si esegue muovendo una finestra di dimensioni ridotte sull'intera immagine e sostituendo il valore del pixel centrale con quello derivante dall'applicazione di una particolare relazione a tutti i pixel contenuti nella finestra. Si distinguono quindi:

- *filtri passa basso*, che enfatizzano le aree con ridotta frequenza (o, analogamente, enfatizzano le variazioni di luminosità su grande scala) riducendo i contrasti (e dunque i dettagli) nell'immagine (filtri medi e mediani);
- *filtri passa alto* che, al contrario, esaltano i piccoli dettagli enfatizzando le variazioni di luminosità su piccola scala (filtri di Sobel, Wallis, ...).

In particolare, un filtro come quello di Sobel ha però anche svantaggi, che quindi devono essere ben valutati prima dell'applicazione: in aree con grandi differenze radiometriche ma texture paragonabile riduce le differenze comportando un miglioramento del matching (ad esempio aree coltivate), ma di contro in aree con texture diverse le discrepanze vengono enfatizzate, riducendone dunque i vantaggi (aree urbane).

- *filtri direzionali e di edge detection* che sono impiegati per evidenziare elementi lineari.

Per ottenere i vantaggi delle diverse tipologie di filtro è possibile applicarli in sequenza, tipicamente iniziando da quelli passa basso.

L'applicazione di filtri per uniformare i valori di radianza risulta fondamentale nel caso di impiego di immagini d'archivio, in maniera da ridurre i problemi di matching; l'impiego di tali dati ovviamente riduce notevolmente i costi, ma comporta il confronto tra immagini acquisite in epoche diverse (per stagione, condizioni meteorologiche e di illuminazione) anche con la possibilità di modifiche sul territorio (nuove costruzioni, piantagioni, ...), per cui deve essere ben valutato in funzione dell'accuratezza desiderata.

Tra le due metodologie di enhancement si ha comunque una differenza fondamentale: il filtraggio genera una nuova immagine, in cui i Digital Number di ogni pixel sono modificati in funzione del tipo di relazione analitica e della dimensione della finestra, mentre lo stretching dell'istogramma favorisce solamente l'interpretazione visiva da parte dell'utente, in quanto per l'algoritmo la differenza di poche unità o di grandi intervalli non comporta alcuna variazione durante l'esecuzione del matching.

4.5.2. Pan-sharpening

Nella creazione di modelli digitali sono normalmente impiegate le sole immagini pancromatiche, mentre le coppie multispettrali, con risoluzione spaziale quattro volte inferiore, sono tipicamente usate per analisi relative alla copertura del suolo ed alla creazione di mappe tematiche. Una possibile tecnica per risolvere tale problema consiste nel pan-sharpening, che consente di ottenere immagini a colori con le stesse dimensioni del pixel tipiche delle pancromatiche.

La tecnica più impiegata [30][40] per tale operazione sfrutta lo spazio IHS (Intensity Hue Saturation), in cui l'intensità indica la brillantezza del colore, la tinta la caratteristica del colore identificata dalla lunghezza d'onda, la saturazione la purezza del colore. È quindi necessario:

- ricampionare le immagini multispettrali alla stessa risoluzione spaziale del pancromatico;
- comporre l'immagine RGB ed effettuare il passaggio nello spazio IHS

$$\begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -\sqrt{2}/6 & -\sqrt{2}/6 & 2\sqrt{2}/6 \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

in cui i valori sono relativi a ciascun pixel dell'immagine composta RGB (v_1, v_2 grandezze che definiscono H, S);

- sostituire la componente di intensità con quella pancromatica;
- ritornare nello spazio RGB

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Pan \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$$

in cui

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R + \delta \\ G + \delta \\ B + \delta \end{pmatrix} \quad \text{con} \quad \delta = Pan - I = Pan - \frac{R+G+B}{3}$$

Per poter applicare tali relazioni bisogna però valutare le singole bande multispettrali acquisite da ciascun sensore e confrontarle con quella pancromatica; in particolare, per IKONOS II, non si ha corrispondenza nella banda blu e il pancromatico ha un'estensione maggiore nella zona NIR, fattore che comporta distorsioni cromatiche (soprattutto per quanto riguarda la vegetazione) nel passaggio allo spazio IHS. Per risolvere il problema è possibile ridurre il contributo δ della componente NIR calcolando:

$$\delta' = Pan - I' = Pan - \frac{R + G + B + NIR}{4}$$

oppure

$$\delta'' = Pan - I'' = Pan - \frac{R + aG + bB + NIR}{4}$$

avendo determinato i due coefficienti per via empirica: $a = 0.75$ e $b = 0.25$.

Oltre ad una valutazione visiva del prodotto finale, un'analisi dei coefficienti di correlazione tra il dato di partenza e la singola banda ottenuta nella composizione RGB finale permette di valutare la correttezza del metodo.

4.6. Validazione del modello estratto

Terminata dunque la fase di elaborazione dei dati, il modello finale deve essere validato al fine di stabilirne l'accuratezza e quindi i possibili utilizzi; come anticipato al paragrafo 3.4, tale fase si esegue con confronti con un set di dati di precisione più elevata. Il parametro statistico fondamentale per tale valutazione è la deviazione standard, definita come livello di probabilità del 68%: analogamente, soprattutto per quanto riguarda studi statunitensi, altro parametro impiegato è l'errore circolare al 90% (CE90).

I metodi più impiegati sono:

1. Confronti puntuali [13]

È sicuramente il più diffuso e consiste in confronti puntuali con un set di punti di controllo a disposizione o rilevati appositamente; in particolare, si consiglia che i CPs impiegati abbiano le seguenti caratteristiche:

- accuratezza di almeno un ordine di grandezza più piccola rispetto alle tolleranze prefissate per coordinate planimetriche e quota (è consentito l'impiego di vertici geodetici esistenti se soddisfano le specifiche richieste);
- coprire almeno il 2% dell'area del modello (con possibile estensione al 4%);
- identificare almeno 20 zone distribuite in modo uniforme e con caratteristiche di copertura del suolo corrispondenti a quelle per cui sono fornite le tolleranze da soddisfare (campo aperto, alberatura >70% e arbusti >50%, edifici);
- fare in modo che in ogni zona siano presenti almeno 20 punti e che, nel totale, per ogni tipo di copertura siano a disposizione almeno 100 punti.
- avere una media campionaria, parametro che esprime la stima della componente sistematica, inferiore ai valori massimi relativi alle specifiche per il livello del modello da verificare.

Possibili sorgenti di dati possono dunque essere:

- Carte Tecniche (per immagini ad alta e altissima risoluzione è comunque difficile che soddisfino le precisioni richieste);
- punti derivanti da rilievi diretti (GNSS cinematici, stop&go);
- quote dei GCPs e dei CPs usati durante la fase di orientamento.

Ovviamente è necessario ricorrere all'interpolazione dei punti della maglia del DSM per identificare la quota corrispondente al punto di controllo (occorre quindi valutare il tipo di interpolazione adottata dal software con cui esso è eseguito). In ambiente urbanizzato tale procedura introduce sicuramente errori grossolani, essendo i punti della carta appartenenti al terreno, mentre i punti della griglia del DSM possono appartenere anche alla sommità di edifici.

Oltre alla divisione in funzione della copertura, potrebbe risultare utile anche una suddivisione in base alle differenti condizioni di illuminazione; allo stesso modo, per indagare più nel dettaglio la dipendenza dalla morfologia del terreno, è possibile fare ricorso anche a mappe di pendenza ed esposizione dei versanti: è infatti stato dimostrato [57] che l'errore medio tra il modello estratto ed il set di dati di riferimento cresce in taluni casi anche più di 1m in zone con azimuth della pendenza opposti alla zona illuminata dal Sole, anche in aree con modeste variazioni di quota.

Il controllo del modello si esegue poi calcolando il valore dell'errore lineare complessivo al 95% di probabilità:

$$LE95_Q = \sqrt{LE95_{MA}^2 + LE95_{CP}^2} \leq T_Q$$

con

$$LE95_{MA} = 1.96 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{MA,i} - Q_{CP,i})^2}{n}} \quad \text{e} \quad LE95_{CP} = 1.96 \sigma_{CP,Q}$$

$LE95_{MA}$: errore lineare al 95% di probabilità del modello altimetrico;

$LE95_{CP}$: errore lineare al 95% di probabilità dei punti di controllo;

$Q_{MA,i}$: quote dei punti del modello altimetrico;

$Q_{CP,i}$: quote dei punti di controllo;

n : numero di punti di controllo;

$\sigma_{CP,Q}$: scarto quadratico medio delle quote dei punti di controllo;

T_Q : tolleranza sulle quote: la verifica deve dunque essere effettuata per le 3 tipologie di copertura del suolo sopra riportate.

2. Confronti globali [13]

Per controlli più approfonditi è possibile eseguire un confronto con un altro modello altimetrico assunto come riferimento, che deve avere precisione in quota molto migliore del modello in esame ($P_{Q,rif} = P_Q/5$). Si possono poi verificare le differenze di altezza in quota (verifica 2.5D), con valori di tolleranza che devono soddisfare gli stessi criteri di quelli per confronti puntuali. Se però il modello altimetrico non è correttamente georeferenziato, si deve valutare la differenza tra i due modelli presi come superfici 3D, vale a dire identificando una trasformazione che li leghi e determinando le distanze euclidee tra le coppie di punti, distanze che devono poi soddisfare i valori di tolleranza richiesti per il livello del modello in esame [7].

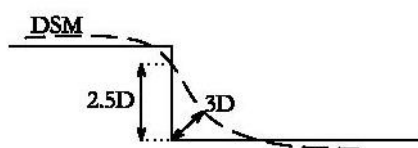


Figura 4-14 - Differenza tra distanza 2.5D e distanza 3D

Per eseguire tale tipo di confronto conviene eliminare le aree di bordo e quelle prossime a zone con dati mancanti per errori di elaborazione che andrebbero altrimenti ad inficiare la bontà del confronto generando degli outliers.

Va inoltre considerato il fatto che raramente le due griglie si corrispondono planimetricamente, per cui quella di riferimento deve essere nuovamente interpolata per ottenere i valori di quota delle posizioni x,y dei punti da esaminare. In funzione del tipo di interpolazione impiegata, della morfologia del terreno e del passo di griglia del modello di riferimento possono pertanto essere

introdotti errori ulteriori da valutare nell'analisi dei risultati. Tale problema è più marcato nelle aree con vegetazione alta od urbanizzate, dove si hanno cioè brusche variazioni di quota anche per ridotti spostamenti planimetrici; questo dipende anche dalle caratteristiche delle immagini e dalle condizioni di presa (angolo di off nadir, ombre, risoluzione spaziale) e costituisce uno dei principali limiti per tali applicazioni.

Altro problema tipico delle aree urbanizzate nei modelli generati con immagini satellitari messo in evidenza da tale tipo di confronti è relativo ad un generale innalzamento della quota media del DSM generato rispetto al piano stradale reale (errori positivi) con un contemporaneo lisciamento dei bordi degli edifici (errori negativi). Un problema analogo si presenta anche in campagna, laddove frutteti, campi coltivati e zone alberate non permettono di ottenere la quota del terreno nudo (in questo caso ciò è strettamente legato al periodo di acquisizione delle immagini).

3. Linee caratteristiche [13]

Innanzitutto, in funzione del livello di precisione richiesto per il modello, tutte le tipologie di linee devono essere presenti (verifica di completezza). Successivamente, in analogia ai confronti puntuali, devono essere rilevati punti di controllo con le seguenti caratteristiche:

- accuratezza di almeno un ordine di grandezza più piccola rispetto alle tolleranze prefissate per le coordinate planimetriche;
- copertura pari ad almeno il 2% dell'area del modello (con possibile estensione al 4%);
- identificazione di almeno 10 zone distribuite in modo uniforme;
- presenza in ogni zona di almeno 10 punti corrispondenti a punti significativi di controllo lungo i tracciati e, nel totale, presenza di almeno 100 punti.

Il controllo del modello si esegue poi calcolando il valore dell'errore circolare complessivo al 95% di probabilità:

$$CE95_{EN} = \sqrt{CE95_{BR}^2 + CE95_{CP}^2} \leq T_{EN}$$

con

$$CE95_{BR} = 1.7308 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{BR,i} - E_{CP,i})^2 + (N_{BR,i} - N_{CP,i})^2}{n}} \quad \text{e} \quad LE95_{CP} = 1.7308 \sqrt{\sigma_{CP,E}^2 + \sigma_{CP,N}^2}$$

$CE95_{BR}$: errore circolare al 95% di probabilità del modello altimetrico;

$CE95_{CP}$: errore circolare al 95% di probabilità dei punti di controllo;

$E_{BR,i}, N_{BR,i}$: coordinate planimetriche dei punti del modello altimetrico;

$E_{CP,i}, N_{CP,i}$: coordinate planimetriche dei punti di controllo;

n : numero di punti di controllo;

$\sigma_{CP,E}, \sigma_{CP,N}$: scarti quadratici medi delle coordinate planimetriche dei punti di controllo;

T_Q : tolleranza sulle coordinate planimetriche.

4. Estrazione di profili

Altra tipologia di confronto consiste nell'estrazione di profili per valutare in modo più dettagliato come il modello estratto approssima la morfologia della superficie.

Per quanto riguarda il dato di riferimento, esso può derivare da un modello di riferimento oppure da rilievi diretti volti proprio alla creazione di sezioni sul terreno.

Sia nelle aree urbane che in quelle con fitta vegetazione viene solitamente mostrato in modo ancor più evidente quanto appena descritto per i confronti globali con modelli di riferimento.

5. Analisi qualitativa

Oltre ad un'analisi quantitativa basata sul confronto con dati di riferimento, anche un'analisi qualitativa del modello estratto risulta ovviamente di grande importanza: ad esempio, da un semplice confronto con i valori di radianza delle immagini di partenza è possibile identificare la causa di aree prive di informazioni (spesso infatti edifici con coperture ad alta riflettività, suoli nudi esposti al sole, specchi d'acqua hanno problemi durante la correlazione automatica). Analogamente, è possibile identificare aree piane omogenee (ad esempio parcheggi) e valutare la deviazione standard dei valori di quota ottenuti (fattibile dunque anche in mancanza di CPs con cui effettuare il confronto diretto).

5. Prove di estrazione da stereocoppia IKONOS II

5.1. Caratteristiche della stereocoppia

Le prime elaborazioni sono state condotte impiegando una stereocoppia (immagini pancromatiche e multispettrali) IKONOS II acquisita sull'area di Ferrara in data 9 luglio 2004 ordinata per eseguire studi preliminari di estrazione di Modelli Digitali della Superficie mediante dati satellitari [41].

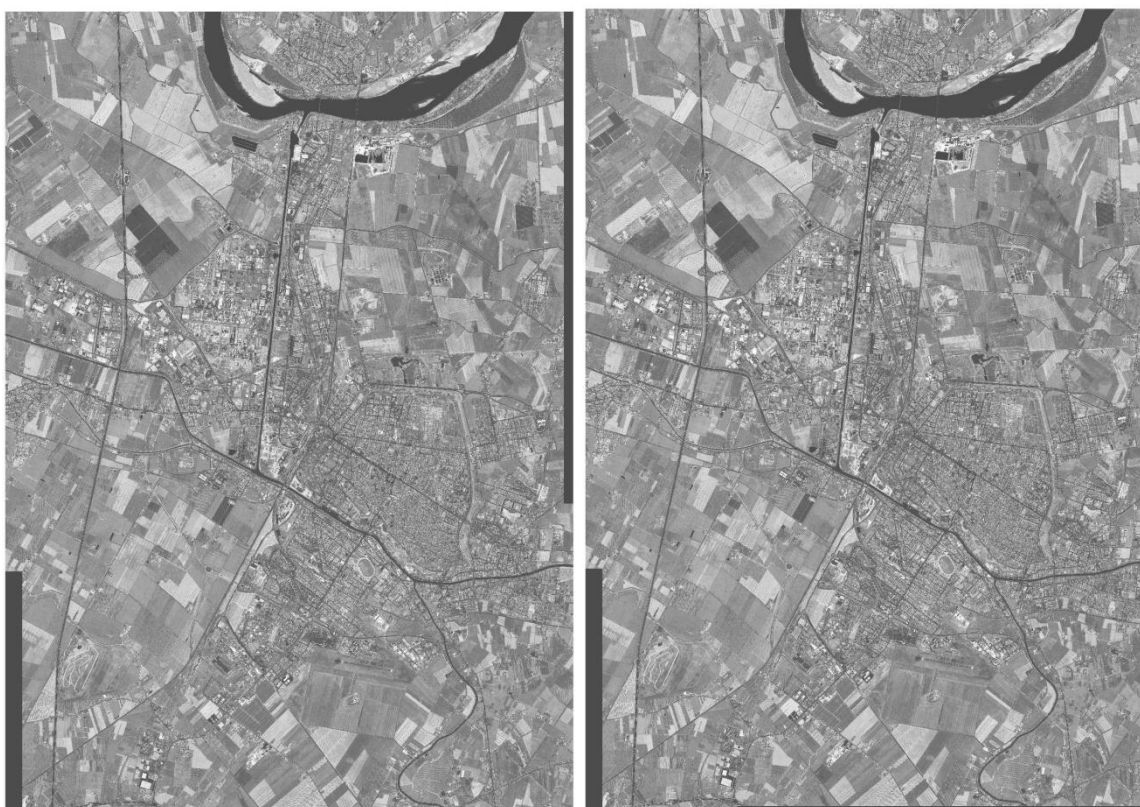


Figura 5-1 - Stereocoppia IKONOS II dell'area di Ferrara

Le immagini, rappresentate in Figura 5-1, sono state acquisite in modalità in-track e fornite ricampionate a 1m per le pancromatiche e 4m per le multispettrali (con risoluzione radiometrica a 11bit) e riproiettate in geometria pseudo-epipolare. Esse sono fornite in formato TIFF (Tagged Image File Format), formato nel quale le informazioni per georiferire l'immagine sono contenute in un file metadata di estensione .tfw (Tiff World Files).

Le principali caratteristiche, contenute nel file metadata generale, sono riportate in Tabella 5-1. Basandosi su tali valori, in Figura 5-2 sono state schematizzate la geometria di acquisizione della stereocoppia e la posizione del sole: la proiezione della congiungente satellite-target rappresenta il collection azimuth (misurato rispetto al Nord geografico e positivo se orario), mentre l'angolo tra il

piano orizzontale e la congiungente satellite-target identifica il collection elevation angle (complementare all'angolo zenitale).

Dettaglio	Valore
Acquisition date	09-07-2004
Processing level	Standard Geometrically Corrected
Bits per pixel per band	11bits
Scan direction	Reverse
Percent cloud cover	0%
Intersection angle	46°.1215
Reference height	49.322m
B/H ratio	0.8
Pixels (rows x columns)	12096x8592

Dettaglio	Prima immagine	Seconda immagine
Acquisition time	10.15.11 GMT	10.16.12 GMT
Acquired PAN cross scan	0.90m	0.92m
Nominal GSD PAN along scan	0.87m	1.02m
Scan azimuth	179°.95	179°.95
Nominal collection azimuth	60°.9438	163°.5991
Nominal collection elevation	71°.31356	62°.56490
Sun angle azimuth	144°.2598	144°.7411
Sun angle elevation	64°.3154	64°.1365
Camera-Target-Sun	83°.3160	18°.8580

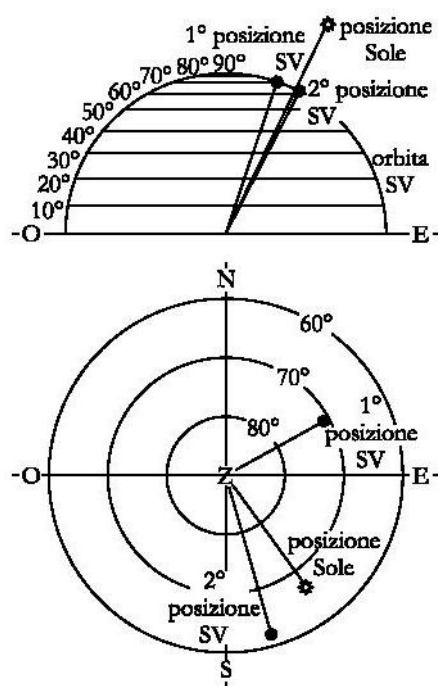


Tabella 5-1 - IKONOS II: caratteristiche della stereocoppia: nella prima tabella sono riportate le proprietà comuni alle immagini; nella seconda tabella sono indicate le proprietà delle singole immagini

Figura 5-2 - IKONOS II: geometria di acquisizione della stereocoppia e posizione del sole

L'area acquisita ha un'estensione di circa 8.5Km in larghezza ed 11.8Km in altezza ed è a carattere fortemente pianeggiante, con quote terreno che variano nell'intervallo 3.5÷18m sul livello medio mare Genova 1942. Come visibile in Figura 5-3, essa comprende l'intera città di Ferrara ed altri paesi della prima periferia, un tratto del fiume Po nella parte Nord, il polo petrolchimico a Nord-Ovest della città, altri aree commerciali nella prima periferia cittadina, un tratto dell'Autostrada A13 che attraversa verticalmente tutta l'immagine nella parte Ovest, mentre il resto dell'area è costituito da edifici isolati e da terreno ad uso agricolo (in prevalenza frutteti e campi coltivati a cereali).

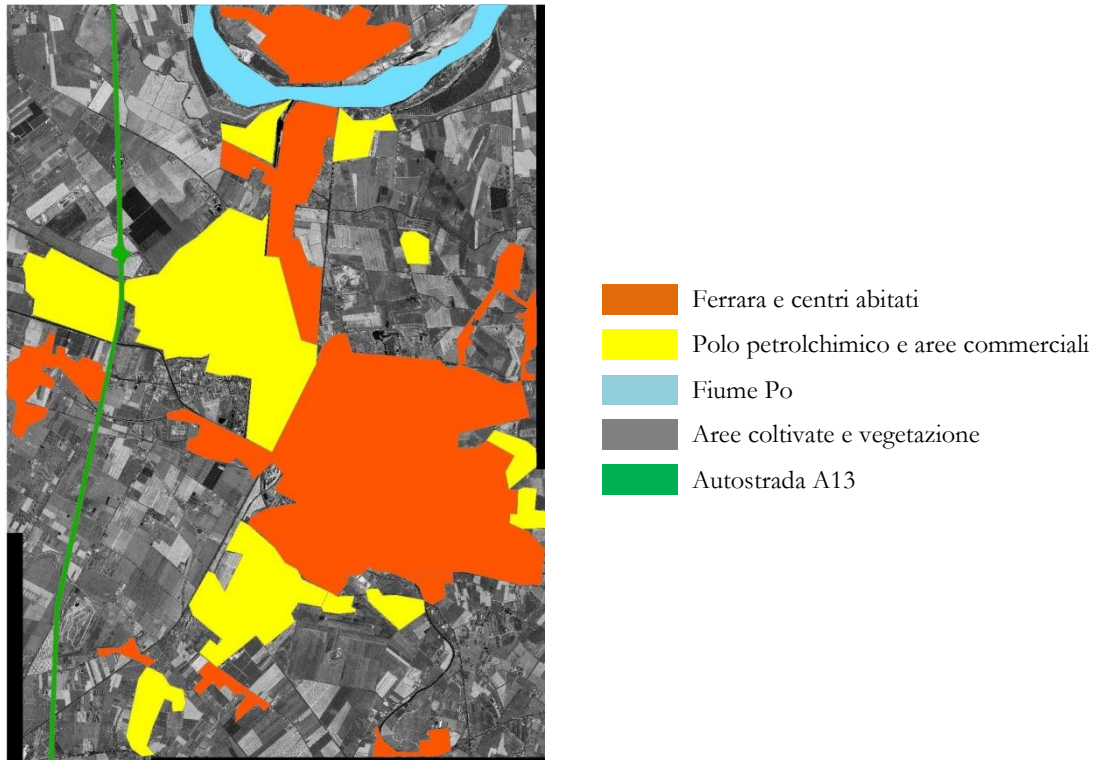


Figura 5-3 - IKONOS II: copertura del suolo dell'area acquisita

In Figura 5-4 è infine visibile un dettaglio delle due immagini raffigurante il centro di Ferrara, in cui è possibile vedere l'alto dettaglio garantito dal GSD di 1m ma anche come nelle zone densamente urbanizzate le strade siano completamente in ombra.



Figura 5-4 - IKONOS II: dettaglio del centro di Ferrara con il Castello Estense

5.2. Le elaborazioni del 2005

Come accennato, tali immagini furono acquisite per compiere studi preliminari nel 2005 [41]. Furono allora rilevati 20 GPs, quasi esclusivamente in intersezioni stradali e parcheggi, con distribuzione uniforme sull'intera area (Figura 5-5). Il rilievo GPS fu condotto in modalità rapido-statica utilizzando strumenti geodetici a doppia frequenza (TOPCON GB500 e GB1000) con stazione master posta su un punto baricentrico di coordinate WGS84-ETRF89 note con alta precisione (situata sul tetto del Dipartimento di Ingegneria). I tempi di stazionamento di 10' con intervallo di acquisizione di 1" hanno consentito di ottenere le coordinate WGS84-ETRF89 dei punti con errori massimi inferiori a 0.1m. Il calcolo delle quote ortometriche è stato eseguito con il software VERTO1 (geoide ITALGEO99) fornito dall'IGM.

Per le elaborazioni fu scelto il software commerciale OrthoEngine v9.1.6 della PCI Geomatics, descritto nel paragrafo successivo.

Per irrobustire il modello impiegato furono anche riconosciuti diversi TPs, sia manualmente (8 punti) che sfruttando la procedura di riconoscimento automatico implementata nel software (12 punti) (Figura 5-5).

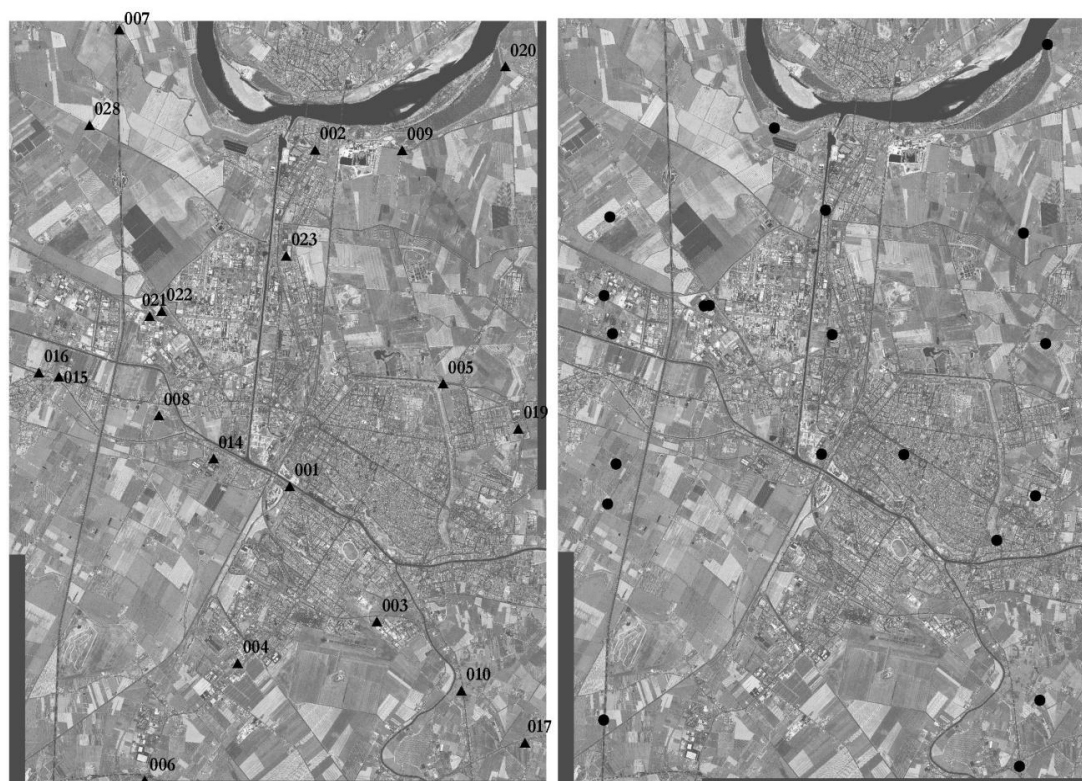


Figura 5-5 - IKONOS II: distribuzione dei GCPs (a sinistra) e dei TPs (a destra) impiegati nel 2005

Le prove di orientamento eseguite (13GCPs + 5TPs, 20GCPs + 12TPs, 20GCPs + 20TPs) mostrarono RMSEs sulle coordinate dei GCPs dell'ordine del pixel, con residui massimi per l'orientamento con il minor numero di punti.

I successivi DEMs estratti furono validati con punti GPS rilevati in aree con copertura differente (§5.10.1), mostrando nel complesso un bias positivo (quota del modello estratto maggiore della quota terreno) variabile nell'intervallo 1÷2m con RMSEs pari a 2÷5m.

5.3. Le elaborazioni del 2009

Dato che i risultati preliminari mostrarono la possibilità di raggiungere buoni risultati, sono state eseguite ulteriori prove relative sia all'orientamento che all'estrazione dei modelli, cercando di ottimizzare le procedure ed i parametri da settare relativi ad ogni singola fase dell'elaborazione.

Durante queste nuove elaborazioni sono stati testati i seguenti programmi:

- *OrthoEngine* (*versioni 9.1.6 e 10.2*) della PCI Geomatics: è il programma commerciale più diffuso per tale tipo di applicazione, permette di eseguire l'orientamento sfruttando sia metodi rigorosi (basati sul modello del Canada Center for Remote Sensing di Toutin; le informazioni necessarie sono lette dai file metadata associati alle immagini ed il modello considera anche l'effetto della rifrazione atmosferica, della morfologia del terreno e della deformazione causata dall'eventuale proiezione cartografica scelta) che polinomiali e razionali (utilizzabili sia con gli RPC forniti assieme ai dati che senza). In entrambi i casi è possibile inserire GCPs e TP per irrobustire l'orientamento e di CPs per la valutazione dell'accuratezza dell'orientamento eseguito, di cui è possibile valutare i residui nei reports creati.

Per quanto concerne la fase successiva di matching ed estrazione del modello, il programma si basa un metodo area based che, sfruttando la geometria epipolare, crea immagini piramidali e progressivamente esegue il riconoscimento dei punti omologhi.

La fase di editing del modello estratto (manuale o mediante l'applicazione di filtri) può essere eseguita con il modulo *FOCUS* dello stesso pacchetto Geomatica.

- *ENVI 4.6.1*: a partire da tale versione del programma si ha anche un modulo per l'estrazione di DEM per immagini acquisite con sensori pushbroom. L'unico modello implementato è quello polinomiale, che necessita degli RPC forniti assieme ai dati grezzi e che consente un affinamento mediante l'inserimento di GCPs.

Per quanto riguarda la fase di matching ed estrazione del modello, il software si basa su un metodo area based con preventiva generazione delle immagini epipolari.

- *SISAR* (*Software per Immagini Satellitari ad Alta Risoluzione*): è sviluppato dal gruppo di lavoro del prof. M. Crespi dell'Area di Geodesia e Geomatica dell'Università di Roma "La Sapienza" a partire dal 2003. Consente di eseguire l'orientamento di immagini satellitari singole e stereocoppie acquisite dai satelliti ad alta risoluzione (EROS A, IKONOS II, QuickBird, WorldView, GeoEye-1) sia con un modello rigoroso che razionale, permettendo inoltre un affinamento degli RPC forniti assieme alle immagini mediante una generazione a partire sia dal modello rigoroso che razionale (§5.6 e 5.7).

Terminata tale elaborazione si ha a disposizione una serie di reports con i parametri di orientamento, i dati sul processo eseguito, i residui e le coordinate calcolate per GCPs, CPs ed eventuali TP's impiegati.

Con i parametri di orientamento ottenuti è possibile estrarre un DSM a partire da una nube di punti sparsi con le coordinate immagine di tutti i punti correlati.

La fase di matching per la generazione della nube di punti costituisce un nuovo tool che è in fase di elaborazione ed ottimizzazione e dunque i test eseguiti (§5.9.3) sono del tutto preliminari e pertanto verranno riportati solamente i più significativi. La procedura è del tipo area based e, per il caso studiato, la geometria quasi epipolare ha permesso una riduzione dell'area di ricerca per la finestra sull'immagine in esame (test limitando ad una sola direzione hanno mostrato problemi in aree edificate in funzione della disposizione degli isolati). Il calcolo della trasformazione affine avviene a diversi livelli di quota con passo e numero definiti dall'operatore, in maniera da adattarli il più possibile alla morfologia del terreno. Per questo motivo (oltre che per limiti di calcolo e problemi di scrittura dell'algoritmo) le aree testate sono di dimensioni ridotte in modo da avere una copertura il più possibile omogenea.

- BLUH: Il programma è stato sviluppato dal gruppo di lavoro del Prof. K. Jacobsen presso l'Università Leibniz di Hannover ed è composto da diversi pacchetti utili nelle differenti fasi dell'elaborazione.

L'orientamento delle singole immagini (modulo RAPORIO) o delle stereocoppie (RPCDEM) è eseguito mediante modelli razionali con RPC forniti assieme alle immagini; nella versione del software testata il modello per IKONOS II non era funzionante per problemi di scrittura del software, dunque non è stato possibile portare a termine tale fase ed il conseguente controllo sui residui dei CPs (BLAN).

Il modulo di matching (DPCOR) si basa su un least squares matching comprendente una trasformazione affine e due parametri per la correzione della radianza. Il problema del ridotto raggio di convergenza legato ai minimi quadrati è risolto mediante una correlazione con region growing: si deve pertanto identificare un gruppo di seed points, composto dai GCPs più eventualmente altri punti omologhi (se una prima iterazione non dovesse essere soddisfacente o in caso di morfologie particolari). Poiché tale fase è eseguita sulle immagini originali con coordinate dei seed points espresse in pixel, è stato possibile testare il programma in diverse aree con copertura omogenea (i parametri sono in tal modo settabili meglio e per limiti di calcolo l'intera immagine non può essere processata) (§5.9.4). Il prodotto finale è un file di testo con le coppie delle coordinate immagine correlate con successo.

Con i parametri dell'orientamento è quindi possibile procedere all'estrazione del modello sulla base dei punti correlati, che può poi essere ricampionato in una griglia regolare di passo opportuno.

La fase di validazione del modello così estratto (*DEMANAL*) (§5.10.2) si basa sul confronto con un DSM di riferimento (che deve necessariamente essere un grid ed è interpolato con un metodo bilineare), con la possibilità di inserire valori di taglio per escludere outliers dal confronto, oltre a valori di pendenza massima.

5.4. Rilievo ed elaborazione dei GPs

Per avere a disposizione un maggior numero di punti con i quali eseguire le elaborazioni oltre ad un set di punti di controllo, in aggiunta ai 20 punti a disposizione ne sono stati rilevati altri 23, sempre cercando di ottenere una copertura omogenea dell'area acquisita e scegliendo punti stabili nel tempo (parcheggi ed intersezioni stradali). Si sono ovviamente valutate attentamente le immagini e si è eseguito un sopralluogo per verificare che lo stato attuale dei punti coincidesse con quello delle immagini del 2004.



Figura 5-6 – IKONOS II: rilievo dei GPs

Con la stessa strumentazione e le medesime metodologie del 2005, nei giorni 27-28-31 agosto sono stati eseguiti i rilievi, rideterminando in ogni sessione anche le coordinate di almeno due punti del vecchio rilievo come controllo sulla qualità dei risultati ottenuti. Mediante VERTO3 è stato poi possibile ottenere le coordinate ED50 e WGS84 dei vertici convertendo anche le quote da ellissoidiche ad ortometriche.

Dopo una prima serie di prove, ci si è resi conto che due targets (numeri 15 e 49) erano affetti da errori grossolani nella collimazione sulle immagini: poiché la posizione ottimale osservando i residui

non è comunque stata ritenuta opportuna, entrambi i punti sono stati eliminati e le elaborazioni ricominciate.

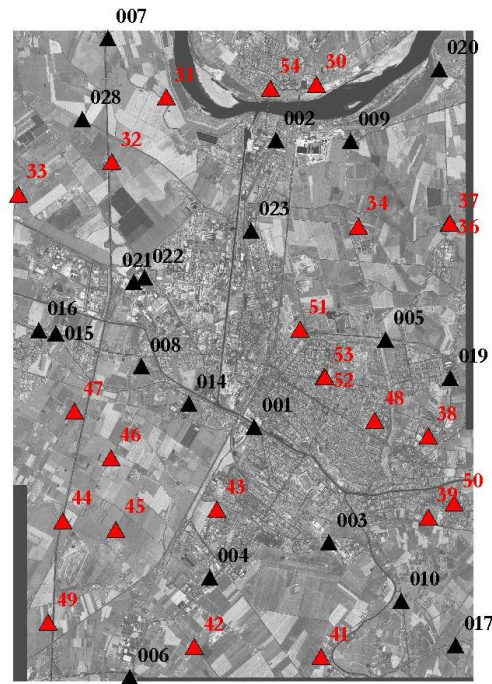


Figura 5-7 - IKONOS II: distribuzione dei GCPs: rilievo del 2005 (▲) e del 2009 (▲)

5.5. Riconoscimento dei TPs

Oltre ai 20 già impiegati nel 2005, sono stati riconosciuti ulteriori Tie Points sulle due immagini, in particolare:

- 20 sono stati utilizzati per le elaborazioni eseguite con ENVI;
- 10 sono stati riconosciuti per completare la distribuzione del set del 2005.

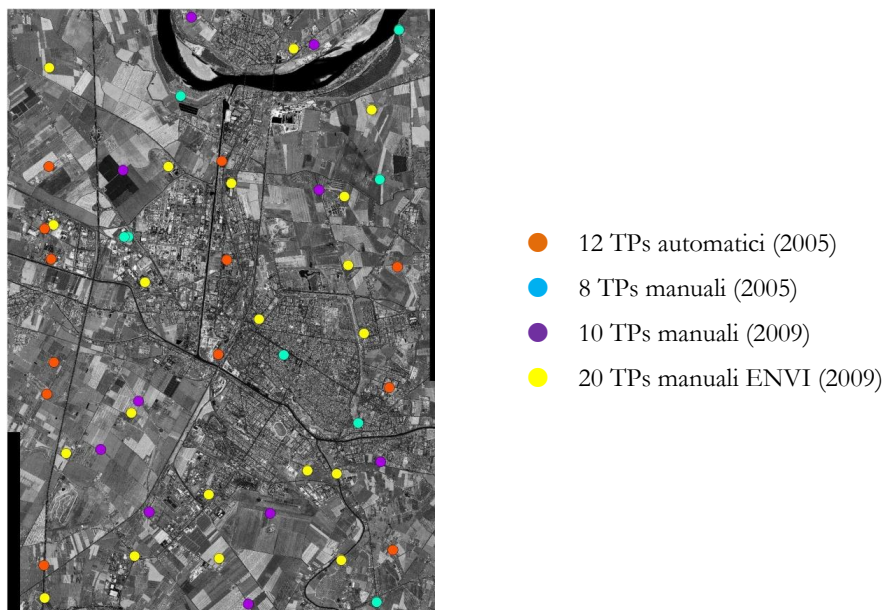


Figura 5-8 - IKONOS II: distribuzione dei TPs

5.6. Orientamento con GCPs

Tutti i test per valutare il numero minimo di GCPs con il quale si ottiene una stabilizzazione dei residui sui punti di controllo sono stati condotti sia impiegando il modulo OrthoEngine del pacchetto software PCI Geomatica che SISAR.

Con OrthoEngine, applicando il modello razionale non è stato possibile valutare i residui dei GCPs nella stereocoppia (è disponibile solamente il report con i residui sulle due immagini considerate singolarmente): sono stati quindi eseguiti solamente test con il modello rigoroso, mentre con SISAR sia impiegando il modello rigoroso che con il RFM. In tutti i casi si sono inserite tolleranze sulle coordinate terreno dei punti di 0.2m in planimetria, 0.3m in quota e di 0.5 pixel sulle coordinate immagine.

Con i 41 punti a disposizione, partendo da 4 GCPs distribuiti in maniera omogenea sulle immagini, sono stati eseguiti 20 test incrementandone il numero con step di 2 alla volta (utilizzando i restanti punti come CPs) sempre cercando di avere la miglior distribuzione. In particolare, l'ordine in cui sono stati aggiunti è riportato in Tabella 5-2.

	Elaborazioni																			
	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
n° GCPs	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	41
ID	6, 7 17, 20	16 19	23 43	41 54	44 51	3 32	37 39	8 48	9 14	33 45	34 47	10 31	5 42	1 21	4 28	2 46	30 38	22 52	50 53	36

Tabella 5-2 - IKONOS II: ID dei 4 GCPs usati per il primo test ed elenco dell'ordine di inserimento dei restanti GCPs

Durante le prime elaborazioni eseguite con OrthoEngine si è visto che con 20 GCPs si raggiungeva un buon assetamento dell'accuratezza, mentre con 6 GCPs si avevano residui stranamente elevati. Per valutare dunque quanto la distribuzione dei punti influenzi i residui dell'orientamento, è stata identificata anche una seconda distribuzione di GCPs per questi due casi; i punti impiegati come GCPs in questa seconda serie di elaborazioni sono i seguenti:

- 6 GCPs: 6, 7, 17, 19, 23, 43.
- 20 GCPs: 3, 4, 5, 8, 9, 10, 14, 21, 28, 30, 32, 34, 36, 41, 42, 44, 48, 50, 52, 54.

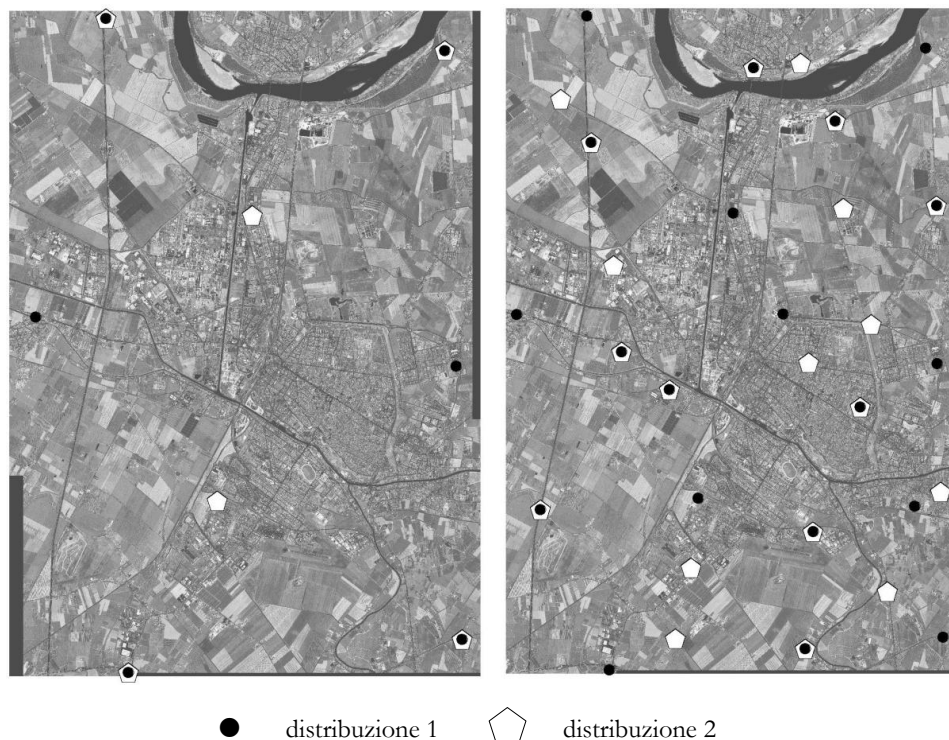


Figura 5-9 - IKONOS II: differenti distribuzioni per i test eseguiti con 6 GCPs (sinistra) e 20 GCPs (destra)

Per brevità, si riportano nei paragrafi successivi i grafici relativi ai residui nelle tre coordinate dei test di orientamento eseguiti (per le distribuzioni con 6 e 20 GCPs sono riportati entrambi i risultati), rimandando all'Appendice A.III.4 per le tabelle con i valori di tali residui.

5.6.1. Orientamento con modello rigoroso

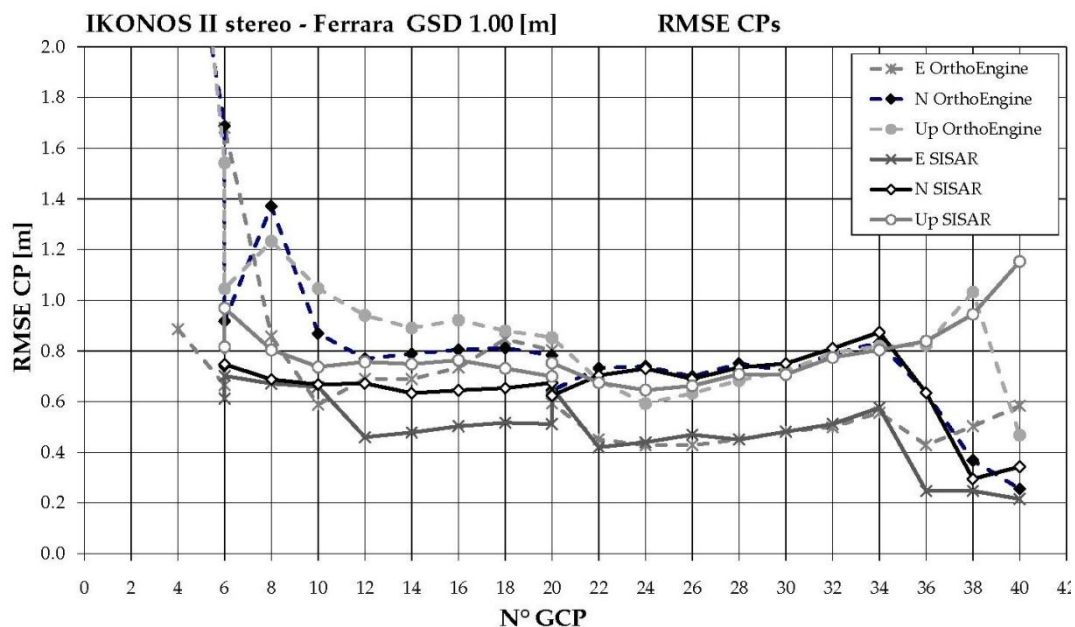


Figura 5-10 - IKONOS II: grafico dei residui di orientamento dei CPs per OrthoEngine v.10.2 e SISAR, modello rigoroso

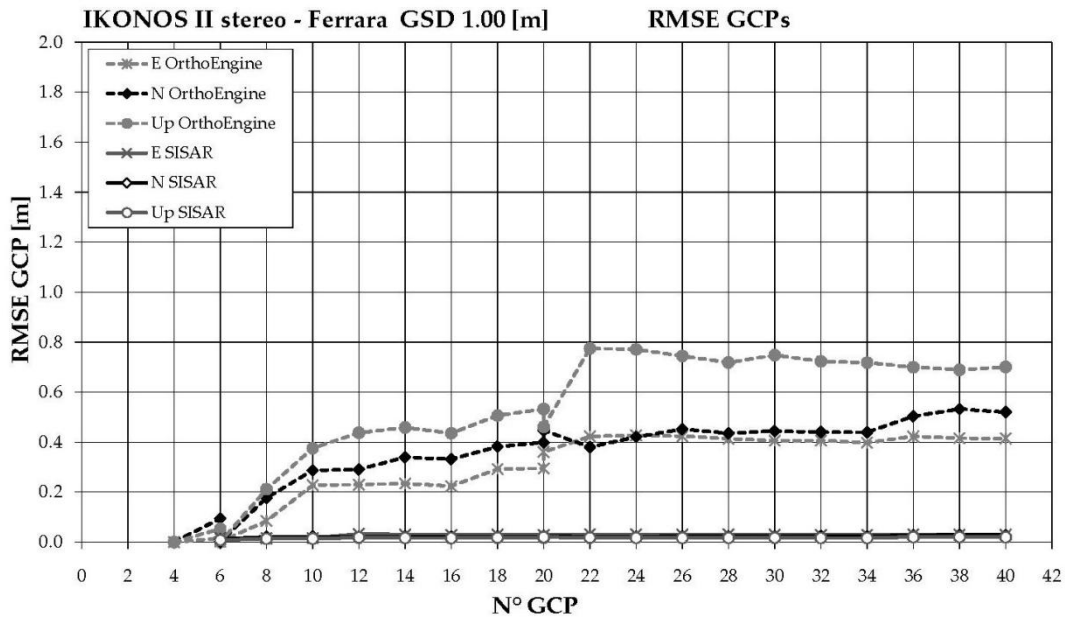


Figura 5-11- IKONOS II: grafico dei residui di orientamento dei GCPs per OrthoEngine v.10.2 e SISAR, modello rigoroso

I risultati mostrano come SISAR sembri più robusto, in quanto già con 6 GCPs l'accuratezza risulta migliore delle dimensioni del pixel. OrthoEngine mostra invece residui in Up maggiori quando il numero di GCPs è basso, inoltre una stabilizzazione dell'accuratezza viene raggiunta con 20-22 GCPs.

In relazione ai test condotti con due differenti distribuzioni, i risultati mostrati in Tabella 5-3 mostrano come con SISAR i RMSEs risultino sempre comparabili, mentre ciò è valido per OrthoEngine solo nel caso di 20 GCPs; quando il numero è basso, il software risulta invece molto sensibile alla distribuzione (preferibili 4 agli spigoli e 2 centrali piuttosto che nelle mezzerie dei lati più lunghi, Figura 5-9).

Software	GCPs	E [m]	N [m]	Up [m]	GCPs	E [m]	N [m]	Up [m]
OrthoEngine	6a	0.67	1.69	1.54	20a	0.80	0.78	0.85
	6b	1.68	0.92	1.04	20b	0.59	0.64	0.85
SISAR	6a	0.61	0.74	0.82	20a	0.51	0.67	0.70
	6b	0.70	0.75	0.97	20b	0.65	0.62	0.75

Tabella 5-3 - IKONOS II: risultati degli orientamenti eseguiti per i test con differenti distribuzioni, modello rigoroso

5.6.2. Orientamento con RFM: SISAR

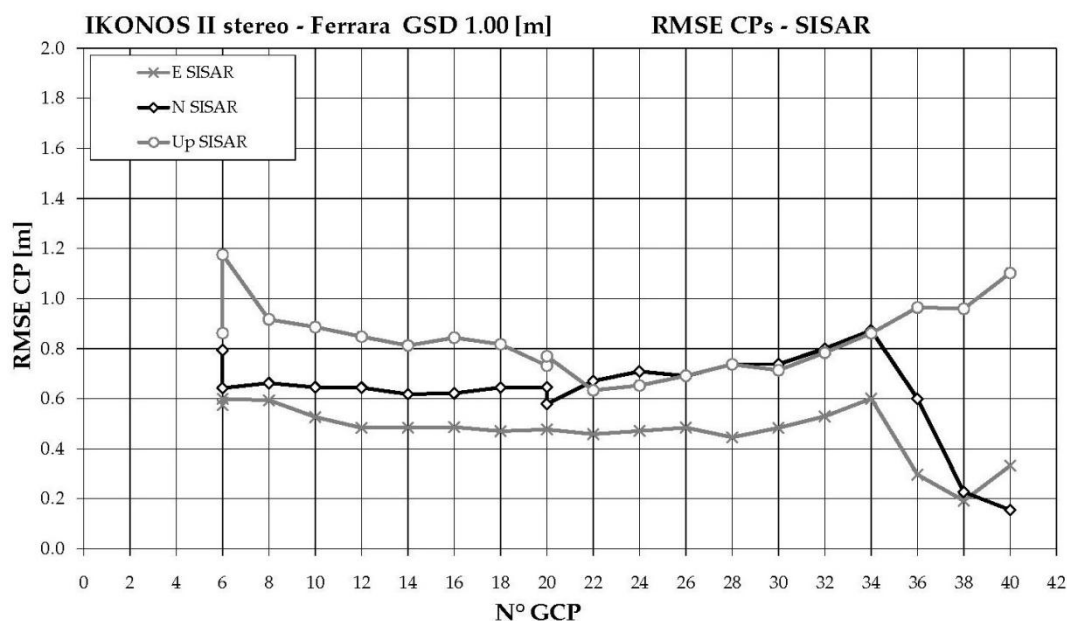


Figura 5-12 - IKONOS II: grafico dei residui di orientamento dei CPs per SISAR, RFM

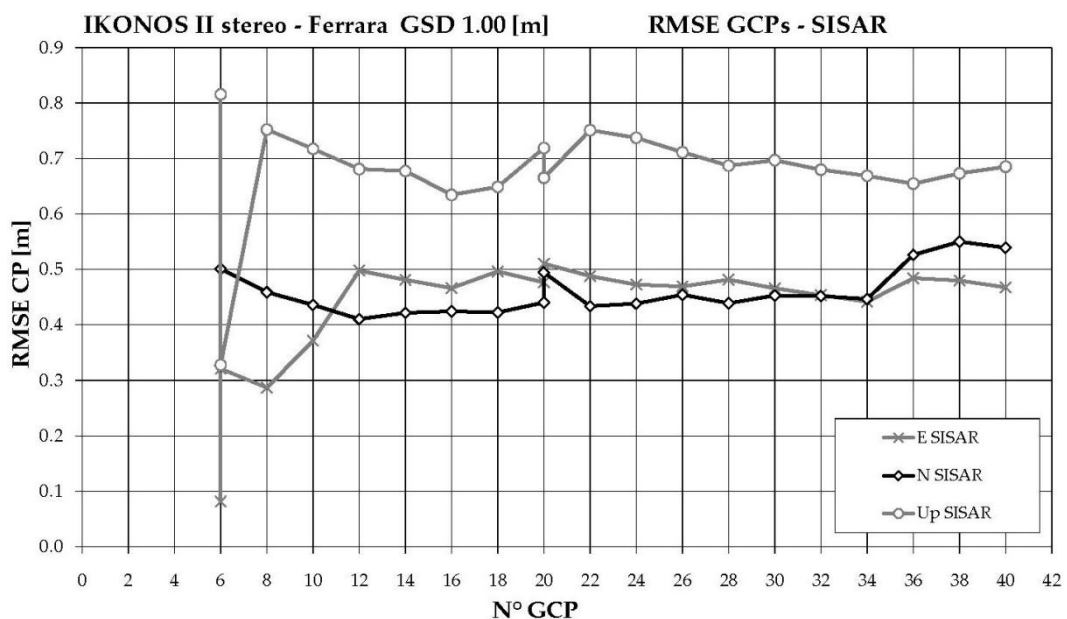


Figura 5-13 - IKONOS II: grafico dei residui di orientamento dei GCPs per SISAR, RFM

Come per il modello rigoroso, già con 6 GCPs si ottiene un'accuratezza migliore delle dimensioni del pixel, con i risultati migliori ottenuti impiegando 20÷26 GCPs. In questo caso i test condotti con le due distribuzioni mostrano anche per SISAR una maggior dipendenza dalla posizione dei punti nel caso essi siano pochi, però con andamento opposto rispetto a quanto espresso al paragrafo precedente per OrthoEngine: la trasformazione sembra essere calcolata in modo migliore con punti al bordo (agli spigoli ed in mezzeria dei lati più lunghi).

Software	GCPs	E [m]	N [m]	Up [m]	GCPs	E [m]	N [m]	Up [m]
SISAR	6a	0.57	0.79	0.86	20a	0.48	0.65	0.73
	6b	0.60	0.64	1.18	20b	0.48	0.58	0.77

Tabella 5-4 - IKONOS II: risultati degli orientamenti eseguiti per i test con differenti distribuzioni con SISAR, RFM

5.6.3. Generazione degli RPC con SISAR

Per testare la possibilità offerta da SISAR di generare propri RPC e validare l'orientamento conseguente dal loro impiego, si sono eseguite differenti prove con la distribuzione composta da 12 GCPs. Partendo dal modello rigoroso sono state pertanto create griglie di passo 5, 7, 9m valutando poi i residui sulle coordinate riga e colonna dei 29 CPs rispetto a quelle riconosciute dall'operatore. I risultati hanno mostrato una sostanziale equivalenza tra le 3 griglie, con residui medi dell'ordine di $0.45 \div 0.8$ pixel. Dato che i tempi di elaborazione aumentano al diminuire del passo della griglia, le ulteriori elaborazioni sono state condotte con un passo di 9m, generando gli RPC anche per il modello con tutti e 41 i GCPs. Dopodiché, per entrambi i test è stato nuovamente eseguito l'orientamento con il modello razionale impiegando i coefficienti generati al posto di quelli forniti assieme alle immagini. I risultati, in Tabella 5-5, mostrano in generale leggeri miglioramenti, comunque tali da non suggerire il ricorso a tale procedura anche in relazione al fatto che comunque i residui migliori sono ottenuti con il modello rigoroso. Risultati del tutto analoghi sono stati ottenuti anche eseguendo le prove con GCPs e TP.

RMSEs 12 GCPs						
Modello	RMSEs GCPs			RMSEs CPs		
	E[m]	N[m]	Up[m]	E[m]	N[m]	Up[m]
rigoroso	0.020	0.033	0.018	0.669	0.457	0.748
RPC	0.498	0.410	0.681	0.483	0.644	0.848
RPC (generati)	0.501	0.328	0.560	0.484	0.662	0.791
RMSEs 41 GCPs						
Modello	RMSEs GCPs			RMSEs CPs		
	E[m]	N[m]	Up[m]	E[m]	N[m]	Up[m]
rigoroso	0.029	0.028	0.020	\	\	\
RPC	0.465	0.533	0.697	\	\	\
RPC (generati)	0.465	0.523	0.644	\	\	\

Tabella 5-5 - IKONOS II: confronti relativi alla generazione degli RPC con SISAR

5.6.4. Considerazioni conclusive

In conclusione, quindi, i due software hanno fornito risultati soddisfacenti ed assai simili in termini di precisione intrinseca ed accuratezza finale anche in dipendenza dalle caratteristiche di acquisizione; SISAR sembra comunque essere più stabile (nei confronti della distribuzione dei punti e del numero minimo che garantisce una sufficiente accuratezza) e offre all'operatore maggiori possibilità di controllo dei risultati ottenuti (in particolare in relazione ai residui durante l'impiego di modelli razionali).

Per quanto riguarda un confronto tra modello rigoroso e razionale, i risultati ottenuti col solo SISAR e riassunti in Figura 5-14 mostrano andamenti totalmente paragonabili, sempre con accuratezze migliori del GSD delle immagini: in Est e Nord le differenze sono trascurabili, mentre in Up il modello rigoroso risulta più stabile anche con pochi GCPs. Analogamente, come detto, anche la generazione di nuovi RPC non ha portato a significativi miglioramenti.

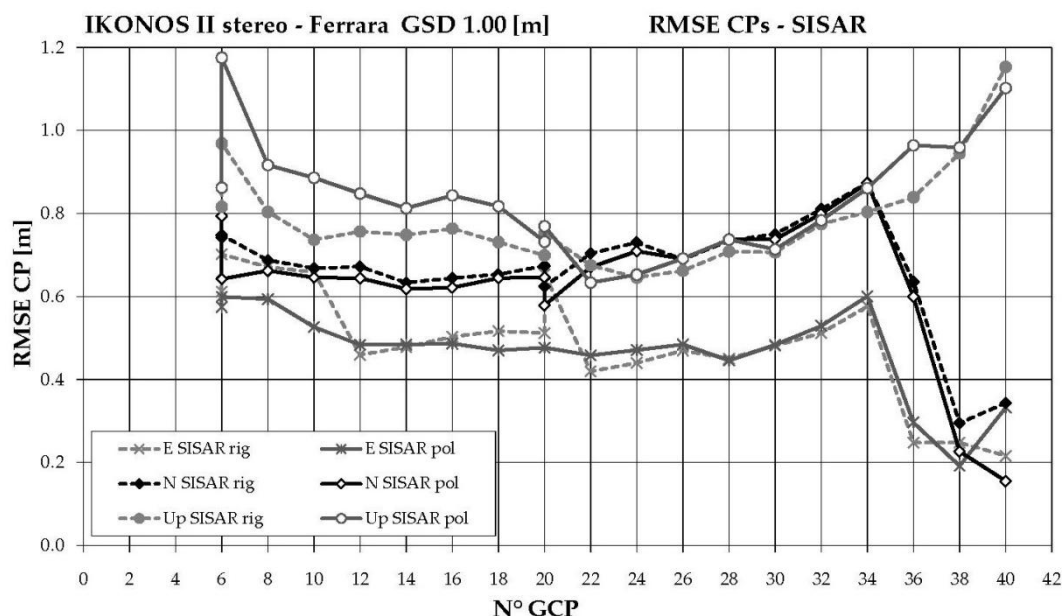


Figura 5-14 - IKONOS II: riassunto degli orientamenti eseguiti con SISAR con il modello rigoroso e quello razionale

Infine, per quanto riguarda OrthoEngine, tutti i test sono stati condotti utilizzando sia GCPs espressi in coordinate UTM WGS84 (necessarie per i confronti con SISAR) che in ED50 (sistema in cui erano inizialmente espressi tutti i punti usati per le validazioni successive): i risultati mostrano, come era logico aspettarsi, piccolissime variazioni (pochi centimetri nei residui solo di alcuni GCPs e CPs), a testimonianza della stabilità del programma.

5.7. Orientamento con GCPs e TPs

5.7.1. Orientamento con modello polinomiale: ENVI 4.6.1

Questi test sono stati eseguiti nella prima fase delle nuove elaborazioni. L'orientamento delle immagini corrisponde ai primi step del tool di estrazione di modelli 3D, composto da un wizard che lega 9 fasi per il completamento dell'elaborazione. Si sono impiegati solo i 20GCPs del rilievo del 2005 e 20TPs nuovi riconosciuti direttamente durante il processo di elaborazione (Figura 5-8). Risultati più dettagliati sono reperibili in [6], comunque in generale il software ha mostrato residui più elevati rispetto ai primi test eseguiti nel 2005 con lo stesso set di GCPs, restituendo valori di RMSEs pari a $2 \div 3$ m. Neppure l'impiego dei TPs, necessario per irrobustire il modello e ridurre i residui, ha permesso di ottenere valori soddisfacenti.

5.7.2. *Orientamento con modello rigoroso*

Tutti i test eseguiti con i soli GCPs sono stati ripetuti inserendo anche i 50 TPs riconosciuti (Figura 5-8). Per quanto riguarda SISAR, i residui in direzione Est e Nord sono risultati del tutto identici, mentre in Up solamente per alcuni punti si sono avute variazioni inferiori a 3cm (comunque con media della differenza fra residui con e senza TPs nulla).

Diverso è stato invece il comportamento di OrthoEngine: con 4 GCPs e con 20 o più, i risultati hanno mostrato andamento comparabile con quello degli orientamenti senza TPs, con medie delle differenze tra i residui con e senza TPs nulle e piccole oscillazioni sui singoli punti in tutte e 3 le coordinate (circa 1cm in Est e Nord e circa 3cm in Up). Per un numero di GCPs compreso tra 6 e 18 il software ha invece mostrato una forte instabilità, a parità di dati inseriti, dipendente anche dal PC su cui i test erano condotti: le coordinate planimetriche hanno sempre dato buoni risultati, analoghi ai test precedenti, mentre in direzione Up si sono avuti residui molto variabili (da pochi metri fino a valori chilometrici). In aggiunta, pur essendo i TPs per definizione esclusivamente riconosciuti sulle immagini (quindi solo di coordinate riga e colonna note), dalla versione 10 del software è comunque necessario inserire anche informazioni sulla loro quota (mediante un valore numerico o con un DSM di riferimento). Per controllare allora la bontà dei TPs inseriti sono state condotte ulteriori prove inserendo alcuni di essi come GCPs o CPs (con le coordinate tridimensionali ottenute dall'elaborazione con 20 GCPs): i residui, mediamente poco più elevati di quelli degli altri punti, sono stati ritenuti accettabili. Ciò ha fatto quindi supporre ad un problema del programma piuttosto che ad errori nel riconoscimento sulle immagini (peraltro confermato anche dal fatto che con SISAR non si è manifestato nessun problema). Un ulteriore problema in questa serie di test è derivante dal fatto che, nel report con i residui, inserendo i TPs non si hanno più i valori dei residui in Up per i GCPs (posti tutti uguali a zero) ma solamente per i CPs.

5.7.3. *Orientamento con modello razionale*

Analogamente a quanto descritto al paragrafo precedente, anche questa serie di test ha fornito esattamente gli stessi risultati, mostrando dunque la stabilità del software e degli algoritmi in esso implementati e quindi la totale inutilità dei punti omologhi durante l'orientamento.

5.8. *Orientamento delle immagini multispettrali*

Per poter estrarre informazioni anche dalle bande multispettrali, sia con OrthoEngine che con SISAR sono stati eseguiti gli orientamenti, necessari per le fasi successive. Data l'acquisizione praticamente simultanea delle immagini pancromatiche e di quelle multispettrali, poiché su queste ultime il riconoscimento dei GPs e dei TPs sarebbe stato assai complicato a causa delle dimensioni del pixel, si è ritenuto sufficientemente preciso utilizzare le medesime coordinate riconosciute sulle immagini pancromatiche, ovviamente riducendole ad un quarto del loro valore. I valori dei residui non variano quindi rispetto a quanto esposto nei paragrafi precedenti.

5.9. Estrazione dei DSMs

Terminate le analisi sugli orientamenti, si è passati alla fase di estrazione dei modelli veri e propri, sia utilizzando ENVI ed OrthoEngine, per l'intera immagine, che SISAR e DPCOR, concentrandosi in questo caso su alcune porzioni con copertura omogenea. In questo paragrafo verranno descritti solamente i modelli estratti e le scelte adottate, mentre si rimanda al successivo per i risultati delle validazioni.

5.9.1. DSMs estratti con ENVI 4.6.1

Nonostante i residui dell'orientamento fossero troppo elevati per ottenere risultati sufficientemente precisi, si è comunque valutata l'intera procedura di estrazione del modello [6]. Inizialmente vengono create le immagini epipolari, poi si hanno le finestre di settaggio dei parametri del modello:

- sistema di proiezione;
- tipo di rilievo presente sulla scena (basso, moderato, alto);
- dimensioni della finestra di ricerca (da 5x5 a 15x15);
- soglia minima del coefficiente di correlazione;
- dettaglio del modello di output (vincola ovviamente il numero di immagini piramidali create e dunque i tempi di elaborazione).

I modelli estratti ed i relativi parametri sono i seguenti:

Modello	DSM_1	DSM_2	DSM_3	DSM_4
Rilievo terreno	moderato	moderato	moderato	moderato
Livello di dettaglio	massimo	massimo	massimo	massimo
Correlazione minima	0.85	0.85	0.80	0.70
Dimensioni finestra di ricerca	5x5	11x11	5x5	5x5

Tabella 5-6 - IKONOS II: parametri dei DSMs estratti con ENVI 4.6.1

Impiegando un notebook con processore Intel Core2 Duo CPU T6400 da 2.00GHz con 4GB di RAM e sistema operativo Windows Vista da 32bit, i tempi di elaborazione risultano di circa 8 ore.

5.9.2. DSMs estratti con OrthoEngine v.10.2

L'estrazione del modello si compone di due passaggi eseguiti in maniera automatica nei quali l'intervento dell'utente è limitato all'impostazione di pochi parametri.

Inizialmente è necessario generare le immagini epipolari, per le quali si è impostata la risoluzione massima (coincidente con le dimensioni effettive del pixel) al fine di evitare approssimazioni derivanti da un ricampionamento conseguente all'incremento delle dimensioni del pixel.

Successivamente si è avviato il processo di generazione, per il quale è stato necessario eseguire numerose prove al fine di ottimizzare tutti i parametri. Quelli rimasti costanti durante ogni prova sono i seguenti:

- *Failure value*: -100, valore assegnato in caso di mancata correlazione in aree interne all'immagine (No data);

- Background value: -150, valore al bordo nel caso di aree prive di sovrapposizione tra le due immagini della stereocoppia;
- DEM detail: high, valore che vincola il numero di immagini piramidali create e dunque il tempo dell'elaborazione;
- Output DEM channel type: 32 bit real (in maniera da non perdere la parte decimale del valore di quota);
- Create geocoded DEM: sì, con georeferenziazione nel sistema cartografico UTM WGS84;

Per quanto riguarda invece gli altri parametri, sono necessarie alcune considerazioni (ulteriori test sono presenti in [6],[20]):

- Minimum e Maximum elevation: tali parametri dovrebbero essere impiegati dal software per determinare la dimensione della finestra di ricerca usata durante il matching. I valori di default coincidono con quelli dei GCP rispettivamente di quota minima e massima. Lasciandoli però invariati si è riscontrata un'eccessiva presenza di No Data nel modello estratto; aumentando progressivamente tale range la percentuale di errori è via via calata. L'anomalia principale consiste comunque nel fatto che, per ridurre le zone di No data, è necessario indicare valori decisamente inferiori e superiori a quelli reali dell'intera area analizzata (comprensiva della quota degli edifici) (Figura 5-15); ciò fa supporre che fin dai primi step dell'elaborazione venga calcolata una quota approssimata dei punti correlati con successo, ma se tale valore è esterno ai limiti imposti i punti vengano esclusi dal raffinamento successivo. Riferendosi infatti sempre alla Figura 5-15, in molti casi le aree escluse nei primi due modelli risultano comunque avere, nel modello di destra, quota compresa anche tra i valori più restrittivi (3÷20m).



min elevation: 3m
max elevation: 20m

min elevation: 1m
max elevation: 50m

min elevation: -20m
max elevation: 50m

Figura 5-15 – IKONOS II: confronto tra le aree di No data (indicate in rosso) per DSMs ottenuti con diversi valori di quota limite

Si sono pertanto adottati i valori rispettivamente di -20m e 50m.

- *Pixel sampling interval*: per le immagini pancromatiche: 1 (per valutare le potenzialità delle immagini), 2 (come valore standard), 4 (per un confronto con i modelli estratti dalle bande multispettrali); per le immagini multispettrali: 1.
- *Fill holes and filter*: parametro che si compone di due fasi, una che consente di editare i pixel contenenti valori di No data con una media dei valori dei pixel adiacenti, l'altra che esegue un filtraggio su tutto il modello. Inizialmente attivato, è stato poi disabilitato in quanto alcune zone prive di informazioni permangono e soprattutto il filtro finale applicato è un filtro mediano che comporta un'eccessiva perdita di dettagli soprattutto in ambito urbano.
- *Create score channel*: se attivato, si crea un raster contenente in ogni pixel il valore della percentuale di correlazione del corrispondente pixel del DSM estratto. Un'analisi di tale raster dopo una prima fase di validazione dei modelli creati ha mostrato che in molti casi non si ha una corrispondenza diretta tra correlazione ed errore nella quota ottenuta (per pixel con elevata correlazione si possono avere residui elevati rispetto ai punti di controllo e viceversa). Dopo i primi test non si è pertanto più creato tale canale.
- *Output option*: parametro strettamente legato al valore di correlazione, presenta 3 opzioni: use last value (default), highest correlation, average. DSMs generati impostando la maggior correlazione sono generalmente risultati molto rumorosi, anche se con percentuali di correlazione quasi sempre superiori al 75%; al contrario, DSMs estratti con il valor medio sono risultati assai meno rumorosi ma con percentuali di correlazione molto basse; si è pertanto lasciata l'impostazione di default in quanto ha prodotto modelli poco rumorosi e caratterizzati da buone percentuali di correlazione.

Mantenute dunque fisse le impostazioni ritenute migliori, sono stati estratti i seguenti modelli utilizzando il metodo rigoroso per la fase di orientamento:

Banda	Coppia epipolare	n° GCPs	Risoluzione [px]
PAN	1-0	41	1
			2
			4
41 + 50 TPs		2	
R, G, B, NIR		41	1
NIR		41 + 50 TPs	

Tabella 5-7 - IKONOS II: riassunto dei DSM estratti con OrthoEngine impiegando il modello rigoroso

Analogamente, con il RFM si sono estratti:

Banda	Coppia epipolare	n° GCPs	Ordine polinomio	Risoluzione [px]
PAN	1-0	41	0	2
			1	
			2	
		41 + 50 TPs	0	
			1	
			2	

Tabella 5-8 - IKONOS II: riassunto dei DSM estratti con OrthoEngine impiegando il RFM

Per quanto riguarda i tempi di elaborazione e le dimensioni del file finale, ovviamente il parametro fondamentale è la risoluzione del pixel nel modello estratto. Impiegando una workstation con processore Intel Xeon Quad-core da 2.66 GHz, 8 GB DDR2 di memoria RAM e sistema operativo Windows XP 64 bit i valori sono risultati essere pari a:

Generazione immagini epipolari						
Stereocoppia		Dimensione file .TIF		Tempi di elaborazione		
Pan		2 x 250MB		~5 min		
Multispettrale		2 x 16 MB		~1 min		
Generazione DSM						
Risoluzione [px]		Dimensione file .TIF		Dimensione score channel	Dimensione progetto *	Tempi di elaborazione
Pan	1	200 MB		102 MB	1.65 GB	~3.5 ore
	2	50 MB		25.5 MB	785 MB	~1.5 ore
	4	13 MB		6.5 MB	550 MB	~20 minuti
Multispettrale	1	13 MB		6.5 MB	110 MB	~10 minuti

Tabella 5-9 - IKONOS II: riassunto di tempi di elaborazione e dimensioni dei progetti creati con OrthoEngine (*: i valori sono calcolati senza considerare la dimensione del file .TIF relativo allo score channel)

Il primo controllo sul modello estratto si ha analizzando il report dell'elaborazione, nel quale sono riportati i parametri impostati, ma soprattutto la percentuale di correlazione positiva dei punti immagine ed un controllo sulle quote dei punti usati durante l'orientamento, con il calcolo delle differenze tra la quota nota del singolo punto (GCP o CP) e quella ottenuta nel modello. I risultati sono riportati in Tabella 5-10 e Tabella 5-11.

DEM	PAN				NIR		R, G, B
	1 px	2 px	4 px	1 px	1 px	1 px	
n° GCPs	41	41	41	41	41	41	
n° TPs	50	\	50	50	\	50	
DEM corr succ %	0.9871	0.9869	0.9876	0.9870	0.9988	0.9985	0.9947
GCPs	Mean [m]	0.1	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3
	RMSE [m]	1.5	1.3	0.9	1.3	1.3	2.3
	Max [m]	3.5	6.6	2.4	3.5	4.4	7.8

Tabella 5-10 – IKONOS II: riassunto dei report della fase di estrazione dei DSM con OrthoEngine col modello rigoroso

DEM	ordine 0		ordine 1		ordine 2		
n° GCPs	41	41	41	41	41	41	
n° TPs	\	50	\	50	\	50	
DEM corr succ %	0.9887	0.9887	0.9881	0.9883	0.9882	0.9887	
GCPs	Mean [m]	0.0	0.0	0.1	0.8	0.0	0.9
	RMSE [m]	0.8	0.8	0.7	1.1	0.7	1.2
	Max [m]	2.3	2.3	2.4	2.9	2.5	3.4

Tabella 5-11 – IKONOS II: riassunto dei report della fase di estrazione dei DSM con OrthoEngine con RFM

Dal confronto tra quote note e quote ricavate durante il matching di tutti i 41 GCPs sembrerebbe esserci sempre una buona corrispondenza: con il metodo rigoroso i RMSEs si mantengono pressoché costanti per i modelli pancromatici, con residui migliori per il modello estratto con passo di 2 pixel e l'impiego dei TPs (al contrario, il corrispondente modello estratto senza punti omologhi è quello che mostra il massimo errore sui residui). Stessi risultati, con errori massimi un po' più elevati, si

ottengono con il modello derivante da immagini NIR; al contrario, con le bande RGB si ha un valor medio di 1m superiore ed errori massimi più che doppi. Valori in generale migliori sembrano derivare con l'impiego dei modelli razionali, con una sostanziale equivalenza al variare degli ordini.

Altro dato da considerare è la percentuale di correlazione ottenuta, che in tutti i modelli è prossima al 99%, mostrando dunque al momento un buon funzionamento dell'algoritmo di matching implementato nel software

Poiché nelle opzioni è possibile caricare più stereocoppie contemporaneamente, si è provato ad usare simultaneamente la pancromatica con le multispettrali. Si è però capito che tale opzione permette solo di mosaicare più stereocoppie di aree adiacenti, poiché il software analizza una stereocoppia alla volta, andando dunque a sovrapporre le informazioni ottenute da quella precedente se le aree coincidono (variando infatti l'ordine in cui si sono state caricate le stereocoppie, il modello finale coincideva con quello precedentemente estratto impiegando solamente l'ultima).

Ulteriori prove sono state condotte impiegando anche la tecnica del Pan-sharpening, generando un'unica immagine a 4 bande con risoluzione spaziale di 1m. Non potendo elaborarle contemporaneamente, le stereocoppie di ciascuna banda sono state nuovamente elaborate, ma i DSMs estratti non mostravano miglioramenti significativi rispetto a quelli generati dalle immagini originali.

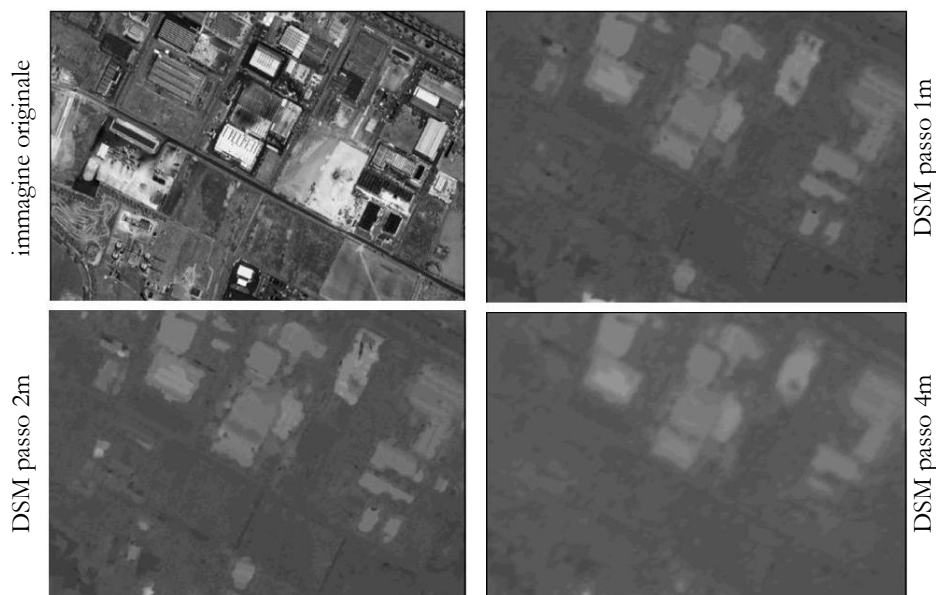


Figura 5-16 - IKONOS II: confronto tra DSMs estratti co differente risoluzione

Analizzando quindi i modelli estratti, all'aumentare del passo si nota un effetto di smoothing generalizzato a causa dell'interpolazione dei dati di partenza, con riduzione dei picchi (positivi e negativi) dovuti ad outliers ma anche con una riduzione nella definizione delle infrastrutture e degli edifici (Figura 5-16); si è inoltre riscontrato un eccessivo rumore ed errate attribuzioni del valore di quota anche in zone con copertura omogenea; le aree che hanno presentato tale problema risultano:

- diverse aree agricole (Figura 5-17);
- diverse strade (anche in rilevato) ed in particolare l'autostrada A13 (Figura 5-17);
- zone alberate in prossimità dell'argine del fiume Po (Figura 5-18);
- le aree maggiormente edificate.

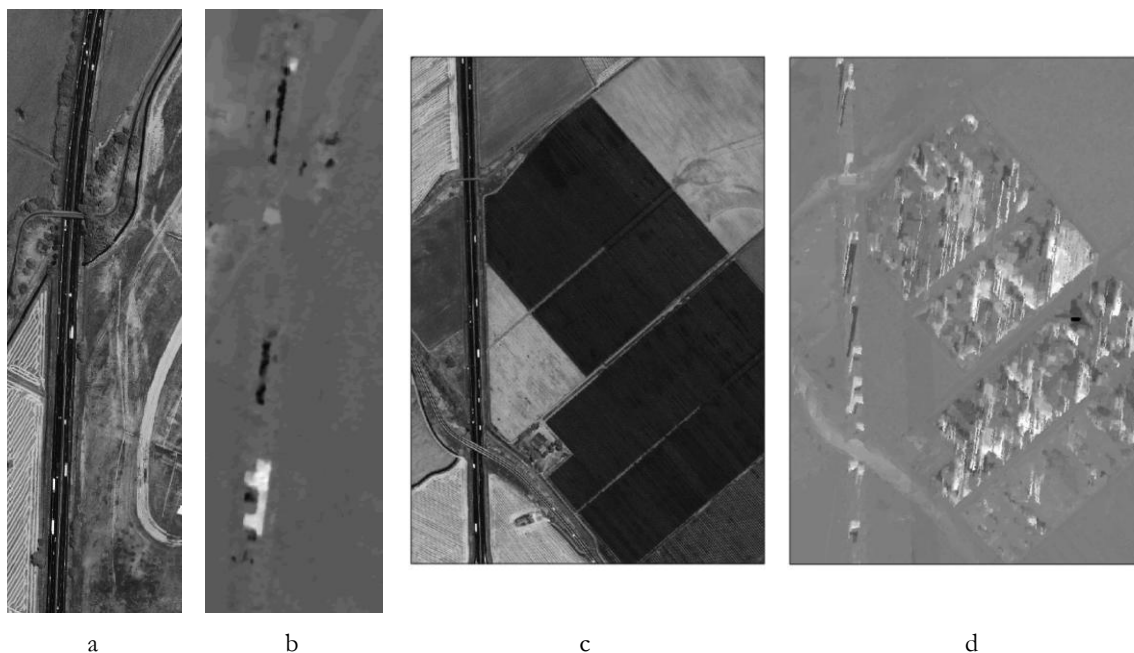


Figura 5-17 - IKONOS II: due esempi di errori di matching nel DSM estratto per autostrada ed aree coltivate; immagine originale (a, c), DSM estratto (b, d)

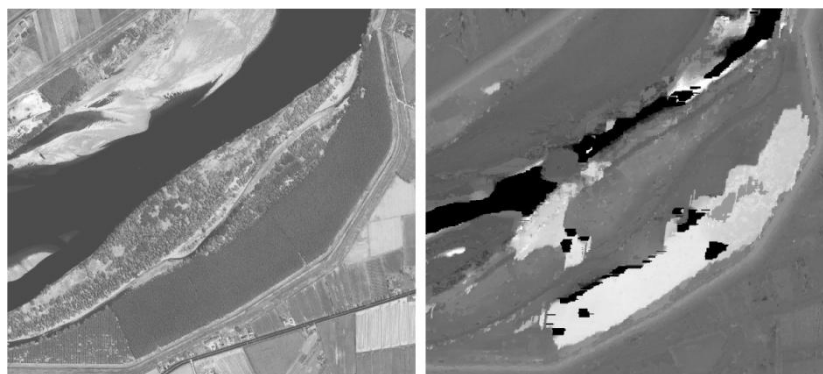


Figura 5-18 - IKONOS II: immagine (a sinistra), esempi di errori nel DSM estratto: zone alberate (a destra)

In relazione a campi e zone alberate, le quote nei modelli pancromatici risultano fortemente rumorose, con picchi positivi e negativi derivanti dall'incapacità dell'algoritmo di matching di correlare correttamente punti in zone con texture molto variabile e pattern regolare; al contrario, nel modello NIR tale fenomeno risulta smorzato, con un andamento altimetrico molto più omogeneo e corretto come valori di quota. Per quanto riguarda i tratti stradali, inizialmente si è attribuita la colpa degli errori nel matching a veicoli in movimento; un'analisi più attenta ha però mostrato un'alternanza nelle quote di picchi e buchi (non solo aree con FailureValue ma anche valori dell'ordine di -10m)

non giustificabile in tale modo. Le aree urbane infine rappresentano come già detto (§4.6) un problema tipico per gli algoritmi di matching, a causa della presenza di ombre e di un numero di dettagli molto elevato (con parallassi molto variabili in funzione dell'altezza e della geometria di presa). Nei modelli pancromatici gli isolati risultano tutti uniti a formare un unico blocco, perdendo la definizione del reticolo stradale, che sembra invece maggiormente percepibile nei modelli NIR.

Per provare a rimediare a tali errori prima della fase di validazione si sono dunque testate anche le procedure di editing manuale disponibili in Focus [6]. In tutti i casi, però, l'operazione non è risultata soddisfacente in quanto:

- i filtri applicati sull'intera immagine vanno a modificare i valori di quota anche in tutte le aree corrette, non mostrando peraltro significativi miglioramenti nelle aree problematiche (anche con l'impiego di più filtri in successione);
- la definizione di maschere per ridurre l'area di applicazione del filtro risulta essere troppo lenta in quanto deve essere realizzata manualmente all'interno del modulo Focus (anche maschere delle aree con No Data Value estratte in ArcMap in modo automatico non hanno potuto essere implementate).

Si è pertanto abbandonata l'ipotesi di correggere mediante Focus i modelli estratti, cercando invece procedure implementabili direttamente in ambiente GIS. Impiegando solamente i modelli derivanti dalle bande pancromatica e NIR, mediante il modulo Spatial Analyst del software Arcview si è implementata una procedura per eliminare le aree di No Data presenti nel DSM pancromatico con risoluzione 1m. Basandosi sul fatto che le zone di No data:

- sono inferiori nel DSM pancromatico con risoluzione 4m rispetto a quello estratto ad 1 m;
- sono in zone diverse nel DSM estratto dalla banda NIR rispetto a quelli derivanti dalle immagini pancromatiche;

i passaggi implementati eseguono le seguenti operazioni:

- sostituzione dei pixel con No data (quota pari a -100m) del DSM pancromatico a 4m con i corrispondenti valori del DSM estratto dalle immagini NIR;
- ricampionamento del modello così ottenuto ad una risoluzione di 1m, in modo da poter sovrapporre i pixel con quelli del DSM pancromatico a passo 1m;
- sostituzione dei pixel con No data del DSM pancromatico a 1m con i corrispondenti valori del DSM appena ricampionato.

Nei paragrafi successivi tale modello sarà indicato con PAN_1m*.

Ultima serie di prove eseguite è stata relativa all'enhancement delle immagini pancromatiche originali al fine di identificare un filtro tale da ridurre o eliminare del tutto i problemi riscontrati durante la fase di matching. Utilizzando sempre il modulo Focus, sono state così eseguite diverse prove implementando filtri di Sobel e di enfaticizzazione del contrasto: in entrambi i casi i nuovi modelli estratti non hanno mostrato miglioramenti significativi né a livello globale né in zone con

coperture specifiche (tali da far pensare ad un loro utilizzo come possibili maschere nella fase di editing implementata in ArcMap).

5.9.3. DSMs estratti con SISAR

Per testare il software, che al momento delle elaborazioni non permetteva l'impiego dell'intera immagine per limiti di calcolo, si sono estratti tre tiles di 3000x3000 pixel nelle zone in cui OrthoEngine ha mostrato problemi di matching ed attribuzione della quota (descritte al paragrafo precedente): il centro di Ferrara (Tile città), una zona agricola con un tratto di autostrada (Tile campagna), una zona dell'argine del Po con vegetazione alta (Tile alberi) (Figura 5-19).

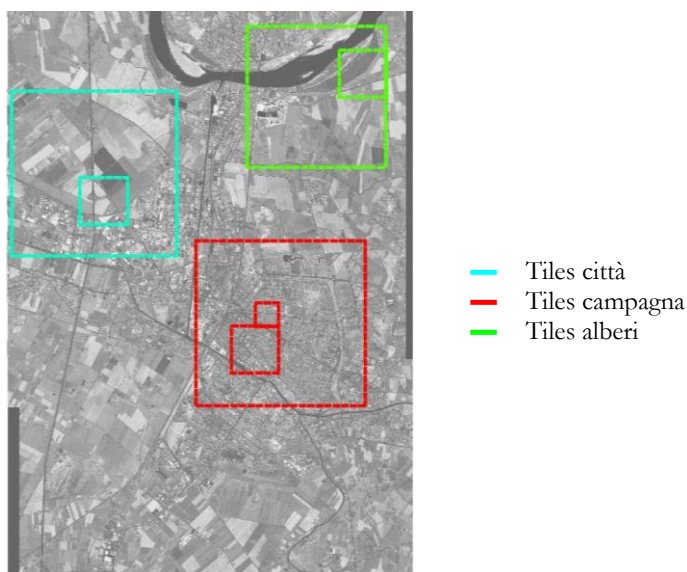


Figura 5-19 - IKONOS II: tiles estratti per le prove di estrazione dei DSMs con SISAR

Per eseguire ulteriori test, le stesse aree sono state estratte anche sulle immagini NIR. Ritagliate dunque le immagini originali con il modulo Focus, si è editato con IDL l'istogramma delle frequenze in ciascun tile salvandolo poi ad 8bit. La fase di matching è stata condotta impiegando un algoritmo sperimentale, che al momento delle prove eseguite era ancora in fase di scrittura ed ottimizzazione al fine di migliorare una prima versione dello stesso testata principalmente in aree rurali. Proprio per questo, inizialmente sono state lanciate elaborazioni per ogni tile con l'algoritmo originale, variando via via l'algoritmo al fine di ottimizzarne i parametri anche per un impiego in aree urbanizzate:

- dimensione della finestra di ricerca (mantenendo fisse quelle del template);
- passo di movimento della finestra di ricerca.

Poiché ogni prova, seppur eseguita come detto su un tile di dimensioni ridotte, durava molte ore, i tile sono stati ridotti a 1000x1000 pixel ed inoltre sull'area urbana sono stati condotti anche su un'ulteriore sottoporzione di 500x500 pixel (Figura 5-19).

Sono quindi stati eseguiti in totale i seguenti test:

- Tile città: 4 test + 5 test sul sottotile;
- Tile campagna: 2 test;
- Tile alberi: 3 test, di cui uno applicando anche un filtro di smoothing alle immagini.

Ottenuti dunque i file testuali con le coppie di coordinate immagine dei punti omologhi, con SISAR si è estratta la nube di punti georeferenziata partendo dall'orientamento ricavato con tutti i 41 GCPs ed i 50 TPs tramite il modello rigoroso, fase che richiede circa 10-15 minuti.

Ultima operazione è stata la creazione di una griglia regolare interpolando i punti sparsi estratti col software. Tale fase è stata compiuta utilizzando il programma Global Mapper, che effettua una semplice triangolazione dei punti caricati, che può poi essere esportata in formato TIF o ASCII scegliendo il passo della griglia regolare (scelto pari a 2m per coerenza con il modello di riferimento, 5.10.2.1).

I modelli risultati migliori sia visivamente che analizzando i file di report sono risultati quelli nelle figure seguenti:

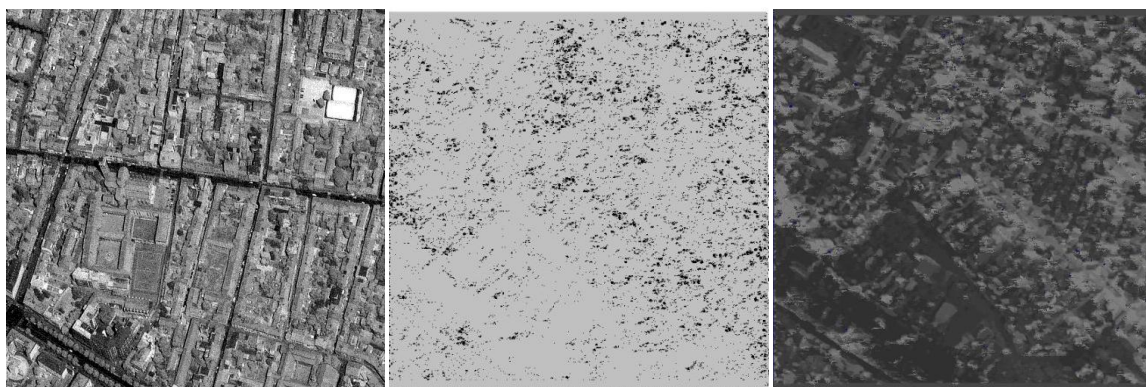


Figura 5-20 - IKONOS II: immagine satellitare (sinistra), punti estratti durante il matching con SISAR (centro), TIF finale per il tile città (destra)

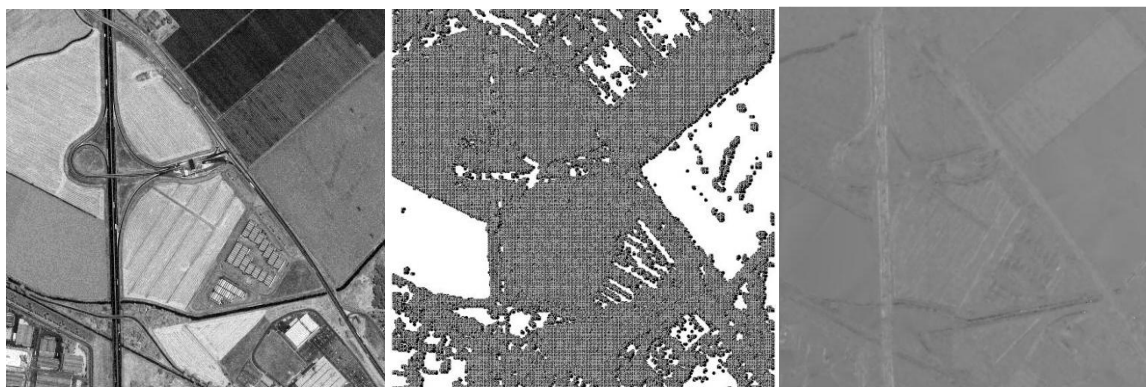


Figura 5-21 - IKONOS II: immagine satellitare (sinistra), punti estratti durante il matching con SISAR (centro), TIF finale per il tile campagna (destra)

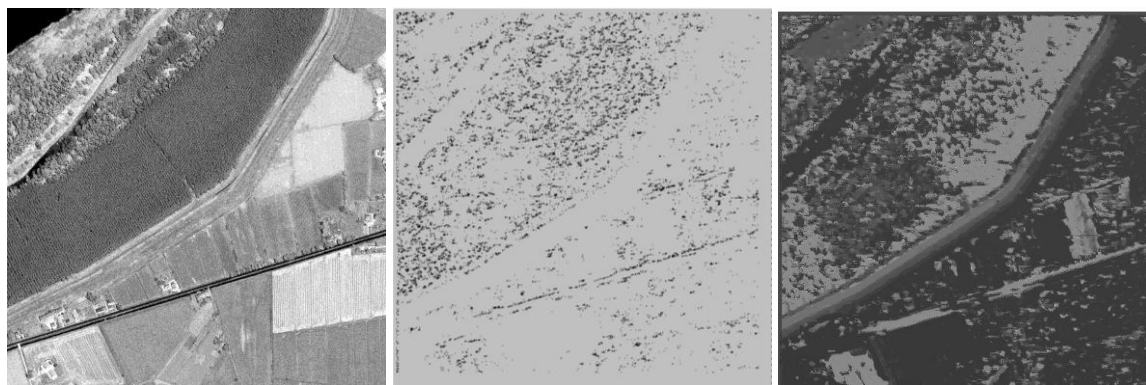


Figura 5-22 - IKONOS II: immagine satellitare (sinistra), punti estratti durante il matching con SISAR (centro), TIF finale per il tile alberi (destra)

Osservando nel dettaglio le nubi di punti relative ai tiles città ed alberi, che appaiono ad una vista globale uniformemente coperti di punti, è comunque possibile notare diverse lacune di forma irregolare.

Per quanto riguarda il tile urbano, le quote variano tra -10m e 45m: i picchi negativi sono outliers, che risultano isolati e solitamente in zone di forte variazione di quota, mentre il limite superiore è coerente con l'altezza dei palazzi cittadini. Il tessuto urbano è difficilmente riconoscibile, comunque sembra essere maggiormente identificabile rispetto a quello estratto con OrthoEngine, in quanto in questo caso è possibile riconoscere parte del reticolo stradale.

Le quote del tile campagna variano tra -1.5m e 17m: anche in questo caso gli outliers negativi sono alcuni punti isolati, mentre in generale l'andamento altimetrico è corretto, con quote maggiori per il rilevato autostradale, che è riconoscibile seppur affetto da un discreto rumore, così come il cavalcavia in corrispondenza del casello d'uscita, solo parzialmente identificato come sagoma e quota.

Nel tile alberi, infine, la quota varia fra 0m e 24m, identificando in modo corretto anche l'area di fitta vegetazione in golenia (anche se con oscillazioni di alcuni metri nel valore di quota) e nel complesso le zone coltivate adiacenti all'argine, di cui è possibile identificare le due banche con dislivelli di circa 2-3m.

5.9.4. DSMs estratti con DPCOR

Gli stessi tre tiles di 3000x3000 pixel usati per SISAR sono stati impiegati anche in questa prova (anche in questo caso si sono impiegati i file ad 8bit salvati in formato BMP). Come detto, tale software si basa però su un algoritmo di matching con region growing, per cui è stato necessario riconoscere diversi punti omologhi in ciascuna area da aggiungere ai GCPs e TPs eventualmente presenti (operazione eseguita in OrthoEngine con export finale delle coordinate immagine dei punti e di quella dello spigolo in alto a sinistra di ciascun tile). In particolare si sono inseriti in tutto (Figura 5-23):

- Tile campagna: 15 punti;
- Tile alberi: 15 punti;

- Tile città: 21 punti appartenenti agli edifici, 20 punti a quota terreno.

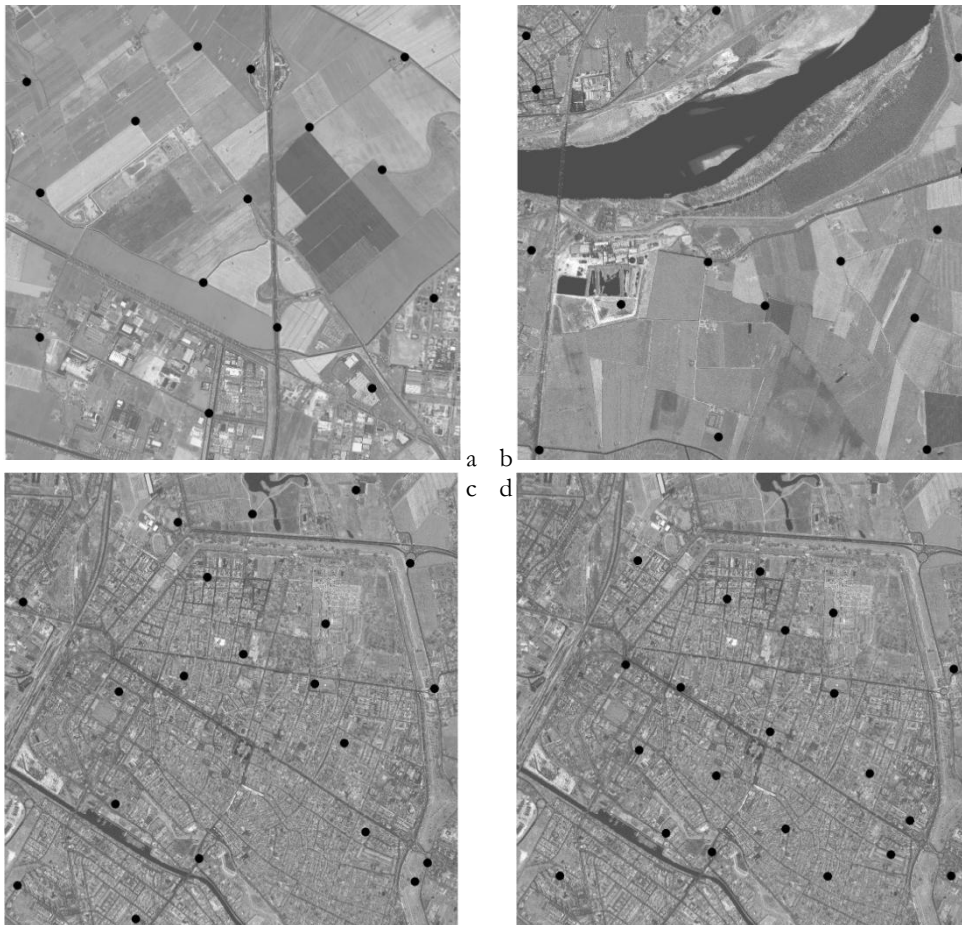


Figura 5-23 - IKONOS II: punti omologhi nei tre tiles per le prove di estrazione dei DSMs con DPCOR: tile campagna (a), tile alberi (b), tile città - punti terreno (c), tile città - punti edifici (d)

Caricati i punti omologhi, i parametri da impostare per eseguire il matching sono:

- Window size: dimensione della finestra di ricerca; si sono provate 10x10, 15x15, 20x20.
- Row/Col step: valore che indica di quanti pixel si muove ad ogni passo la finestra di ricerca; sono state fatte prove con 1x1, 2x2, 3x3.
- CorrCoeff: soglia minima del coefficiente di correlazione; poiché 0.80 risulta spesso troppo elevato, già con un valore di 0.65 si ottengono ottimi risultati; si è impostato 0.5, 0.60, 0.65.
- Growing: se attivato, consente di iniziare la procedura di ricerca dei punti correlati a partire da ogni punto omologo inserito.

Il riassunto delle elaborazioni eseguite e dei punti omologhi ottenuti è il seguente:

Prova	Dimens. finestra [px]	Movim. finestra [px]	Coeff. di correlaz.	Punti match						
				su cui tenta	match positivo	% punti su cui tenta	% match positivo sul totale	% match sui tentati		
immagini PAN	alberi	a	10x10	3x3	0.65	640126	492276	64.0	49.2	76.9
	campagna	a	10x10	3x3	0.65	862099	717261	86.2	71.7	83.2
		b1	15x15	3x3	0.65	757548	620004	75.8	62.0	81.8
		b2	15x15	3x3	0.50	870410	762035	87.0	76.2	87.5
		b3	15x15	2x2	0.65	1624897	1396368	72.2	62.1	85.9
		c1	20x20	3x3	0.65	823796	742875	82.4	74.3	90.2
		c2	20x20	3x3	0.50	939651	869697	94.0	87.0	92.6
	città (terr)	a1	10x10	3x3	0.65	442376	321802	44.2	32.2	72.7
		b1	15x15	1x1	0.60	3440826	3006632	38.2	33.4	87.4
	città (edif)	a2	10x10	3x3	0.65	18202	11135	1.8	1.1	61.2
immagini NIR	alberi	a	10x10	3x3	0.65	58677	51558	93.9	82.5	87.9
	campagna	a	10x10	3x3	0.65	65122	59298	104.2	94.9	91.1
	città (terr)	a1	10x10	3x3	0.65	69275	50650	110.8	81.0	73.1
	città (edif)	a2	10x10	3x3	0.65	69302	50735	110.9	81.2	73.2

Tabella 5-12 - IKONOS II: riassunto delle prove di matching eseguite con DPCOR

I risultati mostrano elevati valori delle percentuali del matching: il numero dei punti correlati rispetto a quelli su cui il matching è stato tentato è sempre superiore al 60% (ultima colonna), più variabile è il dato in relazione al numero totale di punti dell'immagine, in quanto nel tile alberi e nei tile città per le immagini pancromatiche tale valore scende (la trasformazione affine tentata nel tile città alla quota di sommità degli edifici ha dato risultati praticamente nulli). Le prove condotte riducendo il passo di movimento della finestra hanno sensibilmente aumentato i tempi di elaborazione ed il numero di punti identificato, senza però consentire di aumentare le zone in cui tali punti sono posizionati (è aumentata la densità dei punti nelle aree già correlate, quindi nessuna nuova informazione utile è stata aggiunta). Sempre assai elevati sono i valori per le immagini NIR (i valori maggiori al 100% dei punti sono derivanti dal fatto che partendo da seed points differenti alcune aree vengono calcolate due volte, a dimostrazione del fatto che per le immagini multispettrali era sufficiente anche un set di punti omologhi più ridotto).

Anche in questo caso l'elaborazione comporta la creazione di un file con le coppie di coordinate immagine di tutti i pixel corrispondenti, la cui visualizzazione è possibile in tempo reale attivando una maschera all'interno del programma (Figura 5-24). Ogni elaborazione ha richiesto un tempo variabile tra 0.5÷2 ore in funzione del passo di movimento della finestra di ricerca.



Figura 5-24 - IKONOS II: esempio di maschera con i punti correlati mediante DPCOR

Per i problemi nella gestione delle immagini IKONOS II da parte di BLUH (§5.3), l'estrazione del DSM in coordinate UTM WGS84 è pertanto stata eseguita sempre con SISAR, e di conseguenza anche la creazione del TIF finale e l'estrazione della griglia regolare per i confronti sempre con Global Mapper. Esempi dei modelli ottenuti nei tre tiles sono riportati nelle immagini seguenti.

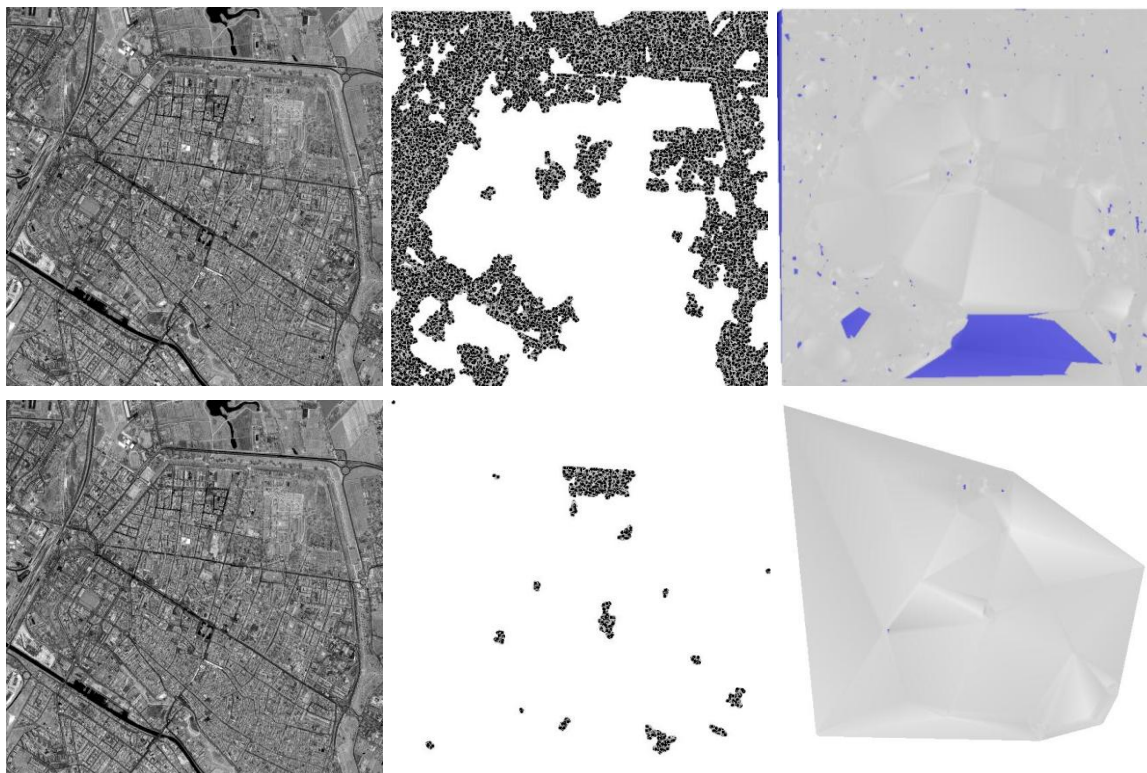


Figura 5-25 - IKONOS II: immagine satellitare (sinistra), punti estratti durante il matching con DPCOR (centro), TIF finale per il tile città (destra) [sopra seed points a quota terreno, sotto sulla sommità degli edifici]

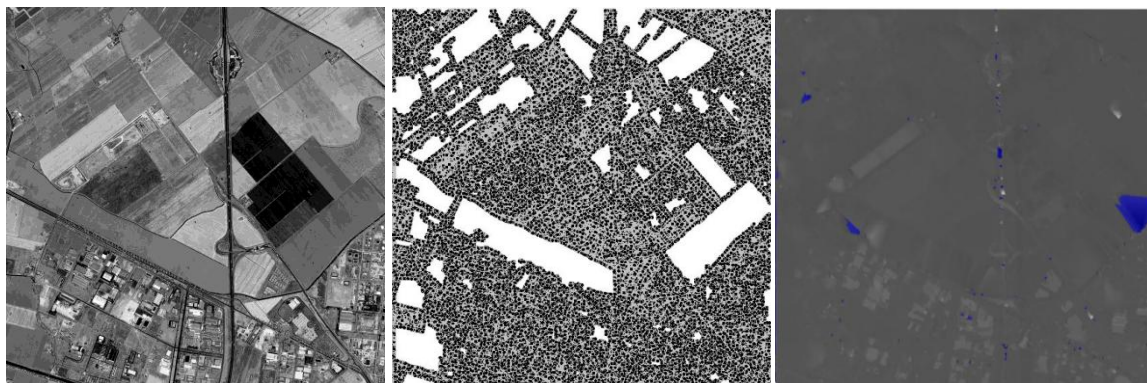


Figura 5-26 - IKONOS II: immagine satellitare (sinistra), punti estratti durante il matching con DPCOR (centro), TIF finale per il tile campagna (destra)



Figura 5-27 - IKONOS II: immagine satellitare (sinistra), punti estratti durante il matching con DPCOR (centro), TIF finale per il tile alberi (destra)

Per il tile urbano la prova con seed points riconosciuti sugli edifici, come già mostrato in Tabella 5-12, non ha portato all'identificazione di alcun punto utile; anche la prova con punti riconosciuti sul terreno ha ovviamente permesso la ricostruzione della zona esterna alla cinta muraria e delle aree verdi all'interno (aree paragonabili ai tile campagna, in cui l'andamento altimetrico è ricostruito correttamente), senza riconoscere alcun punto nell'area più densamente edificata. In aggiunta, alcuni outliers negativi nella zona sud hanno creato un'area con quote fortemente al di sotto dello zero.

Nel tile campagna le quote variano tra -40m e 100m: così come per OrthoEngine si sono avuti problemi nello stesso campo coltivato, mentre in generale la forma e l'andamento altimetrico dei capannoni a sud, del rilevato autostradale e delle capezzagne sono ben individuabili (lungo l'autostrada si hanno comunque numerosi picchi negativi, anche se a differenza di OrthoEngine in questo caso appaiono localizzati solamente in prossimità di veicoli).

Infine, nel tile alberi le quote variano fra -30m e 70m: oltre agli outliers sia in positivo che negativo, l'andamento altimetrico sembra corrispondere a quello reale, anche se risulta in diverse aree più complesso riconoscere il reticolo viario. Così come per SISAR, l'argine risulta ben ricostruito, mentre nella zona golenale, compresa quella con alberi, nessun punto è stato riconosciuto.

5.10. Validazione dei DSMs

La fase di validazione è stata fondamentale per valutare l'accuratezza raggiungibile con modelli estratti da dati satellitari ed ottenere indicazioni sul modello migliore tra tutti quelli generati e sulla procedura di editing implementata.

5.10.1. Confronti con punti di controllo

Sono stati impiegati circa 2000 punti derivanti dai seguenti rilievi (Figura 5-28):

- punti su strade e rilevati arginali acquisiti in modalità cinematica con strumentazione TOPCON GB 500 e GB 1000 (893 punti);
- punti terreno rilevati in modalità cinematica e stop&go con le medesime strumentazioni (1008 punti).

Questi punti, rilevati con un'accuratezza 3D di circa 0.3m, post-processati come i GCPs (§5.4), sono stati analizzati al fine di eliminare possibili outliers e, osservando le immagini georeferenziate, si sono inoltre eliminati quelli in prossimità di oggetti (alberi, auto, cavalcavia, ...) in modo da eliminare possibili fonti di errore grossolano (il punto GPS è infatti a quota terreno, mentre quella del DSM è influenzata dalla presenza dell'oggetto stesso).

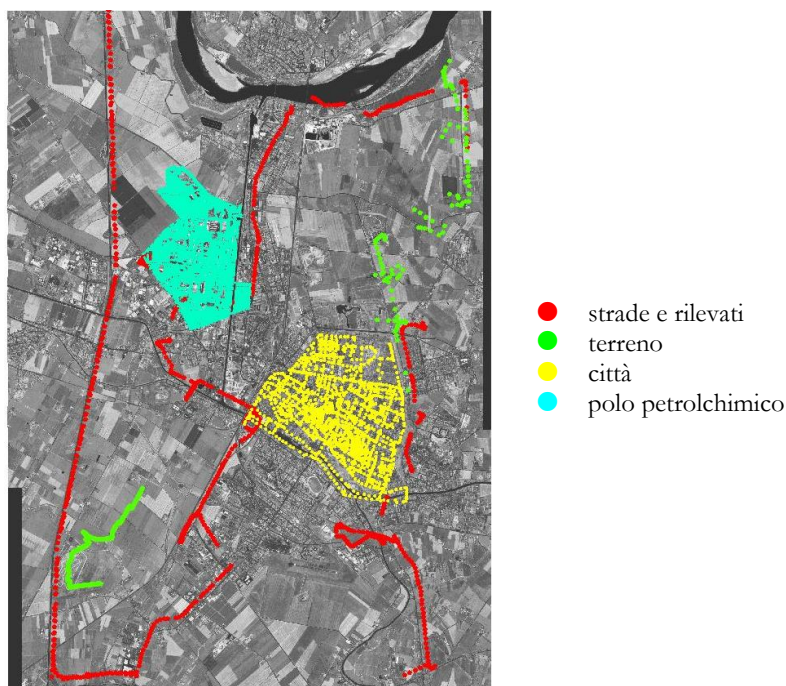


Figura 5-28 - IKONOS II: punti di controllo rilevati

Sono stati inoltre aggiunti altri punti derivanti da precedenti rilievi (Figura 5-28):

- punti derivanti da una livellazione geometrica di alta precisione eseguita con livelli TOPCON DL101C e Leica NA2000 nel centro cittadino (1463 punti);
- punti derivanti da un rilievo aerofotogrammetrico integrato da misure dirette eseguito nell'area del polo petrolchimico realizzato da una ditta incaricata (3451 punti).

Anche in questo caso i punti sono stati analizzati per eliminare quelli in prossimità di oggetti, in particolare per quanto riguarda l'area del petrolchimico (punti in prossimità di container e automezzi); i punti della livellazione sono ovviamente tutti molto prossimi agli edifici (o addirittura capisaldi infissi sulle pareti), per cui non sono stati ridotti e di conseguenza ci si attendono in questo caso residui elevati.

Poiché l'estensione dei tiles impiegati per testare i software scientifici è limitata ed il numero di punti di controllo sarebbe stato eccessivamente ridotto, tale confronto è stato eseguito solamente con i modelli derivati da ENVI ed OrthoEngine.

1. DSMs estratti con ENVI

Tutti i modelli estratti, confrontati con i soli punti GNSS, hanno mostrato residui decisamente elevati risultando dunque non applicabili per studi territoriali [6]. In particolare, eseguendo differenze tra le quote del modello e quelle dei punti di rilevati si è sempre avuto un marcato bias negativo variabile nell'intervallo $-5\div-7\text{m}$, oltre ad un eccessivo rumore nelle quote estratte, testimoniato anche da una deviazione standard di circa 7m.

2. DSMs estratti con OrthoEngine

I risultati in Tabella 5-13 mostrano i confronti di una prima serie di test ottenuti come differenza tra valore di quota nel modello e quota rilevata: i tre modelli R, G, B sono in un'unica riga in quanto hanno fornito risultati identici.

DSM	Tutti i punti					
	Totale punti	Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
PAN_1m	5340	-27.05	42.1	0.73	6.92	6.96
PAN_4m	5344	-21.45	33.53	0.88	5.80	5.87
PAN_1m*	5626	-25.96	42.10	0.88	6.03	6.10
NIR	5129	-22.54	33.33	0.20	6.04	6.04
R,G,B	4961	-30.54	40.53	-0.42	17.46	17.47

DSM	Punti terreno						Punti su strade e rilevati					
	Totale punti	Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	Totale punti	Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
PAN_1m	706	-6.86	9.13	0.15	1.81	1.82	684	-27.05	29.27	-0.03	4.76	4.76
PAN_4m	706	-6.06	11.65	0.24	1.78	1.80	685	-21.45	28.97	0.28	4.44	4.45
PAN_1m*	711	-6.86	9.13	0.15	1.81	1.82	686	-25.96	29.27	-0.08	4.67	4.67
NIR	709	-12.64	9.13	-0.88	2.21	2.38	685	-22.54	19.01	-0.25	3.94	3.94
R,G,B	661	-27.03	9.13	-1.39	3.28	3.57	614	-30.54	14.82	-1.82	5.35	5.65
DSM	Centro Ferrara						Polo petrolchimico					
	Totale punti	Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	Totale punti	Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
PAN_1m	778	-1.96	5.15	1.62	4.27	4.56	3171	-21.05	42.1	-0.54	4.04	4.08
PAN_4m	779	-4.7	29.18	7.10	10.04	12.30	3174	-11.75	33.53	-0.63	2.85	2.92
PAN_1m*	779	-3.7	25.54	7.24	7.48	10.41	3451	-14.35	42.103	-0.37	3.35	3.37
NIR	778	-4.699	40.388	7.15	7.42	10.31	2956	-15.6	5.24	-1.46	3.89	4.16
R,G,B	779	-6.56	33.33	7.89	6.85	10.45	2996	-29	40.53	-1.40	14.48	14.55

Tabella 5-13 - IKONOS II: risultati della validazione con punti GNSS dei modelli estratti con OrthoEngine

Si nota chiaramente come le bande R, G, B risultino al momento del tutto inutilizzabili, avendo deviazioni standard troppo elevate. Per quanto riguarda invece la banda NIR, essa mostra andamenti paragonabili a quella pancromatica in tutte le differenti coperture del suolo analizzate. Come ci si aspettava i valori relativi al confronto con i soli punti del centro cittadino mostrano un bias positivo molto marcato, in quanto risulta difficile per il software di matching attribuire in maniera corretta il valore di quota nel denso tessuti urbano e definire in maniera corretta il reticolo viario. Analogamente, anche il differente passo di estrazione del modello riflette tale andamento: il modello ad 1m risulta più rumoroso e con picchi massimi e minimi più elevati soprattutto nelle aree edificate (città e polo petrolchimico), dove al contrario il modello a 4m mitiga queste oscillazioni. La sostituzione dei pixel con No data ha fatto sì che i parametri statistici analizzati mostrassero valori intermedi tra il modello ad 1m e quelli a 4m, riducendo dunque parzialmente il problema dell'eccessivo rumore di quello a risoluzione maggiore senza peraltro introdurre errori grossolani.

Un'ulteriore considerazione è relativa ai punti scartati manualmente dall'operatore dal set di partenza: anche per tali punti sono comunque stati eseguiti i confronti, notando che i residui risultavano del tutto in linea con il resto dei punti, a dimostrazione del fatto che la presenza di particolari tipi di ostacoli o auto in movimento non influenza negativamente l'algoritmo di matching, la cui scarsa stabilità è dunque da imputarsi ad altre cause.

Una differente serie di controlli è stata condotta solamente con il modello pancromatico derivante da orientamento con metodo rigoroso a passo 2m e per quelli con orientamento con RFM. La tabella seguente mostra i risultati di un'analisi condotta con un test 3σ (DEMANAL, §5.3) sul modello pancromatico generato sia con che senza l'impiego dei TPs: calcolato il RMSE dell'intero set di punti, iterativamente si sono scartati tutti quelli con residuo maggiore di 3σ , aggiornando i parametri statistici fino a quando la procedura è giunta a convergenza non scartando alcun punto. Poiché il software DEMANAL nel calcolo del RMSE non corregge i parametri statistici in funzione del bias eventualmente presente, un algoritmo analogo che risolvesse tale problema è stato implementato in IDL e Matlab.

Modello	Solo GCPs				GCPs + TPs			
Area	Campagna	Città	Polo petrolchimico	Strade	Campagna	Città	Polo petrolchimico	Strade
Iterazioni	6	1	9	9	5	2	7	9
Tot. punti 3σ	665	1455	3125	578	657	1456	3116	582
% scartati	6.5	0.2	9.3	14.5	7.6	0.3	9.3	14.3
Residuo limite [m]	1.70	15.43	2.01	3.54	1.82	15.59	2.12	3.43
Mean [m]	0.59	5.92	-0.65	-0.11	0.43	6.05	-0.68	-0.11
StDev [m]	0.57	5.14	0.67	1.18	0.61	5.20	0.71	1.14
RMSE [m]	0.82	7.84	0.94	1.18	0.74	7.98	0.98	1.15
Max [m]	2.29	21.35	1.36	3.43	2.25	21.65	1.44	3.32
Min [m]	-1.10	-9.51	-2.67	-3.65	-1.38	-9.54	-2.80	-3.53

Tabella 5-14 - IKONOS II: risultati della validazione con punti GNSS dei modelli estratti con OrthoEngine, modello rigoroso

Scartando gli outliers si vede come i risultati migliorino rispetto al test precedente. In zone rurali si ottiene un RMSE inferiore al metro, quindi di buona qualità anche considerando la bassa percentuale di punti eliminati. Come ci si aspettava, in zone edificate i residui rimangono sempre molto elevati e la procedura iterativa si blocca al primo step; al contrario, nella zona industriale con edifici di grandi dimensione ed isolati il software dà ottimi risultati con bassa percentuale di punti eliminati e RMSE dell'ordine del pixel. Risultati mediocri sono stati ottenuti nelle zone dei rilevati stradali, poiché a fronte di un RMSE di poco superiore al pixel si hanno errori limite accettati di 3.5m e quasi un 15% di punti scartati. I risultati mostrano inoltre una totale corrispondenza tra i modelli con e senza l'impiego dei TPs. Poiché un comportamento analogo si è ottenuto anche con i DSMs con orientamento eseguito con modello razionale, per brevità si riporta solo il risultato senza l'utilizzo dei TPs.

Ordine	0				1			
Area	Campagna	Città	Polo petrolchimico	Strade	Campagna	Città	Polo petrolchimico	Strade
Iterazioni	3	2	8	11	8	2	9	7
Tot. punti 3σ	676	1453	3106	600	648	1455	3107	584
% scartati	4.9	0.4	9.8	11.6	8.9	0.3	9.7	14.1
Residuo limite [m]	1.82	15.01	1.88	3.75	1.92	15.15	2.02	2.69
Mean [m]	0.41	6.58	-0.12	0.04	-0.17	6.66	0.02	0.00
StDev [m]	0.61	5.00	0.63	1.25	0.64	5.05	0.68	0.90
RMSE [m]	0.73	8.27	0.64	1.25	0.66	8.36	0.68	0.90
Max [m]	2.22	21.59	1.76	3.79	1.75	21.81	2.05	2.69
Min [m]	-1.41	-8.43	-2.00	-3.71	-2.09	-8.49	-2.00	-2.68
Ordine	2							
Area	Campagna	Città	Polo petrolchimico	Strade				
Iterazioni	6	2	8	7				
Tot. punti 3σ	640	1457	3118	576				
% scartati	10.0	0.3	9.4	15.3				
Residuo limite [m]	1.66	15.31	2.21	2.68				
Mean [m]	0.12	6.32	-0.24	-0.07				
StDev [m]	0.55	5.10	0.74	0.90				
RMSE [m]	0.57	8.13	0.77	0.90				
Max [m]	1.77	21.63	1.97	2.61				
Min [m]	-1.54	-8.99	-2.44	-2.76				

Tabella 5-15 - IKONOS II: risultati della validazione con punti GNSS dei modelli estratti con OrthoEngine, RFM

I risultati sono del tutto analoghi a quanto esposto per l'orientamento con metodo rigoroso. L'ordine zero ha sempre i residui maggiori, mentre per gli ordini 1 e 2 le differenze sono minime, ed entrambi hanno RMSEs migliori del modello rigoroso (particolarmente nelle zone dei rilevati stradali) a fronte di errori limite paragonabili.

Per quanto riguarda invece i modelli estratti da immagini NIR, i risultati sono i seguenti (sempre riportati per il solo modello senza TPs):

Modello	Solo GCPs			
	Campagna	Città	Polo petrolchimico	Strade
Iterazioni	4	2	9	3
Tot. punti 3σ	670	1445	3296	660
% scartati	5.8	1.2	4.5	3.8
Residuo limite [m]	3.82	12.98	5.40	6.67
Mean [m]	0.31	5.37	-0.47	-0.12
StDev [m]	1.27	4.33	1.80	2.22
RMSE [m]	1.31	6.90	1.86	2.23
Max [m]	4.12	18.36	4.94	6.55
Min [m]	-3.51	-7.61	-5.87	-6.79

Tabella 5-16 - IKONOS II: risultati della validazione con punti GNSS dei modelli estratti con OrthoEngine da immagini NIR, modello rigoroso

I risultati mostrano RMSEs e residui massimi accettati quasi sempre più che doppi rispetto al modello rigoroso, solamente in città si ha un andamento opposto, con valori in questo caso leggermente migliori, ma comunque nel complesso scadenti.

Si è valutata infine la possibile influenza dei TPs nella fase di matching confrontando se la distribuzione dei punti scartati nel test 3σ potesse dipendere dalla vicinanza o meno di punti noti. In realtà si è visto che l'andamento dei residui è totalmente casuale ed indipendente dalla vicinanza di punti omologhi e di oggetti isolati.

5.10.2. Confronti con DSM di riferimento

5.10.2.1. DSM AGEA

L'Agenzia per le Erogazioni in Agricoltura (AGEA) realizza annualmente, su un terzo del territorio nazionale, ortofoto per la certificazione della produzione agricola per permettere i controlli previsti nelle normative comunitarie per l'erogazione dei contributi agli agricoltori. Nel 2008 la Regione Emilia Romagna ha stipulato un accordo per realizzare sull'intero territorio regionale *Ortofoto Multifunzione*, vale a dire un insieme di prodotti composto da ortofoto 1:10000 a colori, ortofoto 1:10000 all'infrarosso, modello altimetrico delle superfici DSM per calcolare la quota degli edifici, foto aeree digitali stereoscopiche con pixel medio di 50cm; tale dataset può essere distribuito da parte della Regione alle Pubbliche Amministrazioni per attività istituzionali ed è parzialmente pubblicato sul web per una fruizione generale.

Il DSM messo a disposizione ha dunque le seguenti caratteristiche:

- posting: 2m;
- formato file: .TIFF, .tiff e file ASCII con le coordinate X, Y, Z di ogni posting;
- tipo di file; 32bit per pixel, float;

- sistema di riferimento: Gauss-Boaga fuso 32;
- quota: ortometrica;
- no data value: 0 sul mare, -999 sul territorio esterno a quello regionale;

e viene fornito per tasselli (tiles), secondo il taglio della cartografia CTR 1:10000.

Esso è stato ottenuto mediante correlazione automatica tra i fotogrammi aerei orientati, analizzando il risultato per identificare aree prive di correlazione o con valori scarsi; tali aree sono pertanto state editate manualmente usando come riferimento la coppia stereoscopica dei fotogrammi aerei in visualizzazione tridimensionale. L'accuratezza di tale prodotto è pari a 3m LE90%, in cui il valore di LE90 rappresenta la distanza lineare entro cui si trova il 90% dei control points usati per la validazione del modello; tale valore è stato ricavato confrontando la quota del DSM con quella, misurata con tecniche più accurate, di punti al centro di aree piane con pendenza non superiore al 20%, prive di vegetazione e di dimensione di almeno 10x10m. Il risultato ottenuto è da riferirsi al DSM finale, ovvero includendo anche le zone editate manualmente.

Prima di impiegarlo per i confronti, i singoli file corrispondenti ai fogli CTR sono stati uniti, mediante VERTO3 le coordinate trasformate nei sistemi WGS84 ed ED50 ed infine si è estratta nuovamente una griglia regolare. Il modello è stato inoltre ulteriormente verificato confrontandolo con i punti descritti al paragrafo precedente: i valori nelle differenti aree sono risultati abbastanza stabili, mostrando una deviazione standard coerente con i 3m dichiarati ed un bias costante su tutta l'area che è stato eliminato prima di procedere con i confronti.

5.10.2.2. Confronti eseguiti

È stato in questo caso possibile testare sia i modelli generati da OrthoEngine che quelli derivanti da SISAR e DPCOR, eseguendo differenze tra il modello in esame e quello di riferimento.

1. DSMs estratti con OrthoEngine

Come per le verifiche con punti di controllo, anche in questo caso i modelli generati sono stati suddivisi in due set; i primi risultati ottenuti sono i seguenti [20]:

DSM	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
PAN_1m	0.02	5.07	5.07
PAN_4m	0.01	5.06	5.06
PAN_1m*	0.06	5.19	5.19
NIR	-0.15	5.32	5.32

Tabella 5-17 - IKONOS II: risultati della validazione con il DSM di riferimento per i modelli estratti con OrthoEngine

Si ha un buon accordo con quanto descritto al paragrafo precedente per i confronti puntuali: a fronte di una media praticamente nulla per tutti i modelli, le deviazioni standard risultano comunque elevate, con errori maggiori concentrati principalmente nelle aree edificate.

I risultati più significativi ottenuti con il secondo set di modelli estratti ed eseguiti con DEMANAL (§5.3) sono i seguenti, sempre relativi ai soli modelli estratti senza TPs dato il totale accordo dei risultati (oltre all'intera immagine si riportano anche i dati relativi a tiles di 3000x3000 pixel):

Modello	Rigoroso, immagine PAN				Rigoroso, immagine NIR			
Area	Totale	Alberi	Campagna	Città	Totale	Alberi	Campagna	Città
Tot. punti 3σ	24820000	3038084	2906136	2915754	6131247	878380	764058	808602
% scartati	10.9	12.8	8.8	9.7	6.9	5.5	5.6	5.2
Residuo lim. [m]	5.13	5.95	3.98	8.84	7.78	8.70	6.92	11.20
Mean [m]	1.37	0.87	1.64	1.83	1.47	1.36	1.89	1.86
StDev [m]	1.71	1.98	1.33	2.95	2.59	2.90	2.31	3.73
RMSE [m]	2.19	2.17	2.11	3.47	2.98	3.20	2.98	4.17
Max [m]	6.50	6.82	5.62	10.67	9.25	10.05	8.81	13.06
Min [m]	-3.76	-5.08	-2.34	-7.01	-6.30	-7.34	-5.03	-9.33
Modello	Razionale di ordine 1, immagine PAN							
Area	Totale	Alberi	Campagna	Città				
Tot. punti 3σ	24774735	3538034	3184042	3228479				
% scartati	12.0	15.3	8.2	9.8				
Residuo lim. [m]	4.65	5.05	3.88	8.84				
Mean [m]	1.35	0.99	1.53	1.16				
StDev [m]	1.55	1.68	1.29	2.95				
RMSE [m]	2.06	1.95	2.01	3.17				
Max [m]	6.00	6.04	5.41	10.00				
Min [m]	-3.31	-4.06	-2.35	-7.68				

Tabella 5-18 - IKONOS II: risultati della validazione con il DSM di riferimento per i modelli estratti con OrthoEngine

Scartando gli outliers, rispetto alla tabella precedente i risultati migliorano in maniera sensibile: un modello nel complesso migliore non è chiaramente identificabile, quello razionale sembra mostrare deviazioni standard di poco più contenute anche se ha percentuali mediamente maggiori per i punti scartati. In particolare, si è mostrato solo il risultato relativo all'ordine 1 poiché non si sono apprezzate variazioni significative per gli altri; unica differenza si è notata nell'inserimento dei TPs: se in tutte le altre prove ciò non comportava modifiche, per gli ordini 1 e 2 sono state eseguite più iterazioni, scartando circa un 2% di punti in più, con un calo delle medie di circa 0.5m e deviazioni standard comunque paragonabili (il RMSE è calato, ma anche in zone rurali è rimasto mediocre, con valori comunque attorno ad 1.5m).

2. *DSMs estratti con DPCOR*

I risultati più significativi (ricavati con DEMANAL, §5.3) tra tutti i test descritti in Tabella 5-12 sono mostrati nella tabella seguente:

Modello	Punti non interpolati			Punti interpolati		
Area	alberi_a	campagna_a	campagna_c1	alberi_a	campagna_a	campagna_c1
Tot. punti 3σ	492272	717261	742876	2236208	2237992	2242486
% scartati	10.7	6.2	5.2	5.3	7.7	6.3
Residuo lim. [m]	3.61	3.00	2.91	7.94	3.34	3.17
Mean [m]	0.44	2.10	2.08	1.25	2.09	2.09
StDev [m]	1.20	1.00	0.97	2.65	1.11	1.06
RMSE [m]	1.28	2.32	2.30	2.93	2.37	2.34
Max [m]	4.06	5.09	4.99	9.19	5.43	5.26
Min [m]	-3.17	-0.90	-0.83	-6.70	-1.25	-1.08
Modello	Punti non interpolati					
Area	città_a1	città_a2	città_b1			
Tot. punti 3σ	321722	11125	3000480			
% scartati	13.4	18.2	83.6			
Residuo lim. [m]	3.28	6.97	3.14			
Mean [m]	1.48	0.88	1.45			
StDev [m]	1.09	2.32	1.05			
RMSE [m]	1.84	2.48	1.79			
Max [m]	4.76	7.85	4.59			
Min [m]	-1.80	-6.08	-1.69			

Tabella 5-19 - IKONOS II: risultati della validazione con il DSM di riferimento per i modelli estratti dalle immagini pancromatiche con DPCOR

I test eseguiti con il tile alberi mostrano buoni residui per i punti sparsi, poiché l'alta percentuale di punti scartati corrisponde alla zona in secca del letto del fiume (che non era stata esclusa dall'area di matching e che nel modello di riferimento risulta a quota nulla). La creazione della griglia comporta però un aumento dell'errore per via dell'eccessiva approssimazione introdotta (molti punti trovati e corretti appartengono a gruppi di alberi al bordo delle strade presenti e quindi in prossimità di campi all'interno dei quali pochi punti sono stati al contrario identificati), che rende quindi il DSM non sufficientemente preciso.

I test eseguiti sul tile campagna hanno mostrato che a parità di dimensione della finestra (test eseguiti con finestre 15x15 e 20x20, Tabella 5-12), variare il passo di movimento della finestra ed il coefficiente di correlazione minimo non comporta alcuna variazione. Analogamente, la variazione della dimensione della finestra comporta piccolissime variazioni dei risultati (RMSE sempre pari ad un pixel e punti analizzati comparabili come numero totale), mostrando i valori via via migliori con dimensioni di 15x15, 10x10 e 20x20. In questo caso, essendo ben distribuiti i punti riconosciuti e ridotte le variazioni altimetriche, la creazione della griglia a partire dalla nube di punti sparsi non ha comportato peggioramenti sui dati. Nel complesso, però, i valori di RMSE risultano troppo elevati

(sembra esserci un bias con quota media del modello estratto superiore) così come i residui massimi accettati.

I test eseguiti nel tile urbano sono relativi alle sole nubi di punti sparsi: il ridotto numero di punti correlati introduceva nel processo di creazione della griglia errori ovviamente inaccettabili (RMSE dell'ordine di 6÷10m). La prova con seed points a livello terreno aumentando la dimensione della finestra a 15x15 e riducendo ad 1px il passo di movimento (città_b1) ha dato risultati analoghi a quella standard (finestra 10x10 e passo di 3px, prova città_a1), in quanto come si vede oltre l'80% dei punti trovati in più è stato scartato, punti che come detto (§5.9.4) sono comunque situati nelle aree periferiche ed in quelle verdi e non nelle zone più densamente edificate. I residui sono in generale molto buoni, ma il numero di punti riconosciuti è del tutto insufficiente per permettere la costruzione di un DSM della zona.

Per le immagini NIR si ha:

Modello	Punti non interpolati			
	alberi_a	campagna_a	città_a1	città_a2
Tot. punti 3σ	45614	54157	49114	49021
% scartati	11.5	8.7	3.2	3.2
Residuo lim. [m]	5.30	3.63	13.97	13.91
Mean [m]	0.50	0.44	0.56	0.54
StDev [m]	1.77	1.21	4.66	4.64
RMSE [m]	1.83	1.29	4.69	4.67
Max [m]	5.79	4.08	14.53	14.46
Min [m]	-4.80	-3.19	-13.41	-13.37

Tabella 5-20 - IKONOS II: risultati della validazione con il DSM di riferimento per i modelli estratti dalle immagini NIR con DPCOR

La creazione della griglia ha dato risultati del tutto analoghi; i valori risultano migliori rispetto alle immagini pancromatiche solamente nel tile campagna: in parte ciò è dovuto all'assenza del bias prima descritto, in parte è comunque dovuto al fatto che il residuo massimo accettato è ancor più elevato.

Da ultimo, tutti i test condotti avendo estratto il DSM con orientamento eseguito mediante funzioni razionali hanno dato risultati del tutto analoghi nel tile campagna, mentre con deviazioni standard fino a 0.5m superiori nelle altre due aree.

3. *DSMs estratti con SISAR*

I risultati dei modelli più significativi (calcolati con DEMANAL, §5.3) sono i seguenti:

Modello	Punti non interpolati		
	alberi	campagna	città
Area			
Tot. punti 3σ	740044	71331	\
% scartati	2.5	5.7	8.0
Residuo lim. [m]	10.55	2.28	9.55
Mean [m]	0.38	-0.84	1.93
StDev [m]	3.52	0.76	3.18
RMSE [m]	3.54	1.13	3.72
Max [m]	10.93	1.44	\
Min [m]	-10.17	-3.12	\

Tabella 5-21 - IKONOS II: risultati della validazione con il DSM di riferimento per i modelli estratti con SISAR

Per quanto riguarda il tile alberi il residuo massimo accettato è troppo elevato così come il RMSE; in aggiunta, analizzando la distribuzione dei residui, il rilevato originale mostra errori superiori ai 3m, mentre valori dell'ordine dei 2m si ottengono nei campi coltivati adiacenti (l'applicazione del filtro di smoothing non cambia i risultati ed elimina tutti i punti correlati proprio nella zona con vegetazione alta).

Il tile campagna ha dato buoni risultati in termini di numero e distribuzione dei punti riconosciuti e di RMSE, con valori di poco superiori alle dimensioni del pixel. In particolare, tale valore migliora ulteriormente nelle sole zone coltivate, in quanto si hanno residui maggiori localizzati lungo il cavalcavia dell'uscita autostradale e nella zona sud con più capannoni.

In conclusione, le prove migliori con il tile città sono state ottenute con la finestra di ricerca di 20x20 pixel (i valori maggiori tentati per tenere in considerazione la parallasse e l'altezza degli edifici davano RMSE quasi doppi). Anche in questo caso, comunque, il residuo limite accettato è molto elevato, quindi il RMSE di quasi 4px non risulta soddisfacente.

5.10.2.3. *Considerazioni conclusive*

I risultati delle tabelle del paragrafo precedente possono essere riassunte in questo confronto tra i tre software (Tabella 5-22), in cui per uniformità i test più significativi sono stati nuovamente condotti nel tile campagna 1000x1000 ed in quello città 500x500 (poiché nessuno dei tre programmi ha modellato in maniera soddisfacente l'area di vegetazione fitta, il tile alberi non è stato considerato) valutando la significatività con il LE95:

Tile	Campagna			Città		
	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
OrthoEngine	1.24	1.66	2.07	0.93	3.66	3.78
DPCOR	1.17	1.29	1.74	3.45	6.12	7.02
SISAR	1.69	1.35	2.17	-0.36	3.88	3.9

Tabella 5-22 - IKONOS II: riassunto della validazione con il DSM di riferimento per i modelli estratti con tutti i software testati

Nel tile campagna DPCOR dà i risultati migliori, mentre OrthoEngine e SISAR sembrano del tutto simili. In Figura 5-28 si vede in realtà come DPCOR e SISAR modellino in maniera analoga e nel complesso corretta non solo i campi ma anche il rilevato autostradale; entrambi risentono come OrthoEngine, seppure in maniera minore, dello stesso problema di matching nel campo in alto a destra. La principale differenza consiste nel range di quote del modello: esclusi gli outliers negativi, effettivamente DPCOR sembra avere valori più simili al modello di riferimento, mentre SISAR pare mostrare un bias negativo. Molto più estesa è la zona con problemi di matching per OrthoEngine, che in generale riconosce sia i rilevati che gli edifici in modo più irregolare e con la tendenza ad aumentare la dimensione. Nel complesso, quindi, i valori di residuo di quasi 2 pixel e la capacità di identificare gli oggetti sul territorio sono buoni per tutti e tre i software ma non permettono di impiegare il modello generato per studi di elevata precisione.

Nel tile città, come già detto DPCOR si è mostrato del tutto insufficiente per la creazione del modello. SISAR e OrthoEngine mostrano anche in questo caso residui analoghi, anche se i due programmi mostrano bias di segno opposto: come per l'area rurale SISAR sembra sottostimare le quote, mentre al contrario esse sono mediamente più alte rispetto con OrthoEngine. In generale, quindi, in questo caso i modelli generati non possono essere ritenuti soddisfacenti per la descrizione della morfologia della città. Osservando in dettaglio i modelli in Figura 5-30 si vede come OrthoEngine non permetta quasi per nulla l'identificazione del reticolo stradale e come gli isolati sembrano essere tutte "chiazze" deformi di quota all'incirca costante. Con SISAR le quote sono meglio definite (i picchi positivi risultano molto ridotti ed isolati) ed è possibile identificare meglio le strade e le corti interne dei palazzi di dimensioni maggiori.

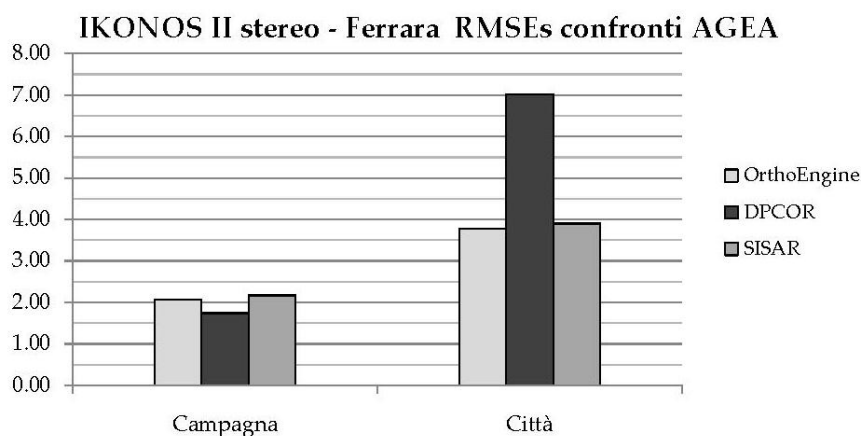


Figura 5-29 - IKONOS II: confronto tra i RMSEs per i modelli estratti in entrambi i tiles

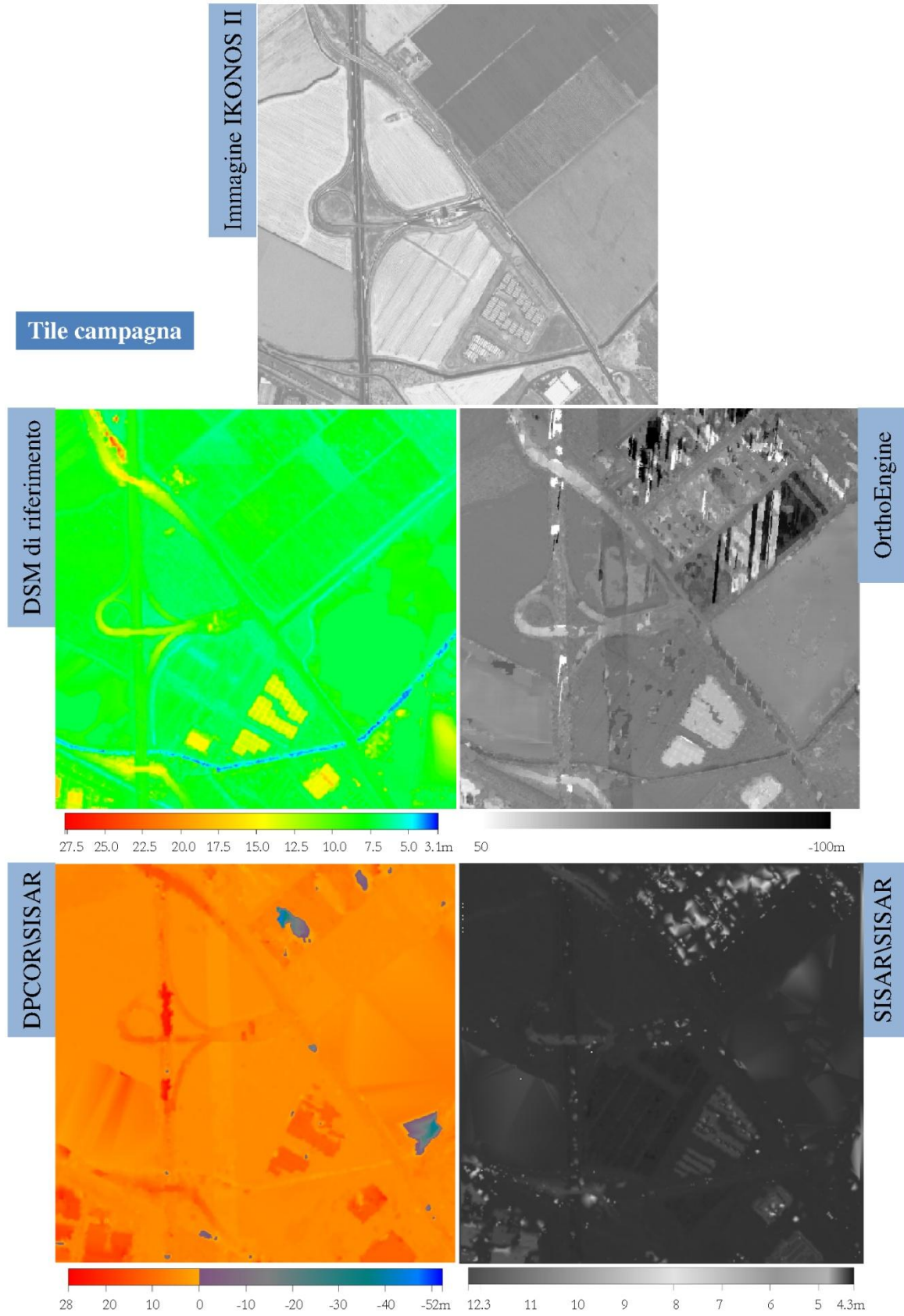


Figura 5-30 - IKONOS II: visualizzazione dei dati di riferimento e dei DMSs estratti per il tile campagna

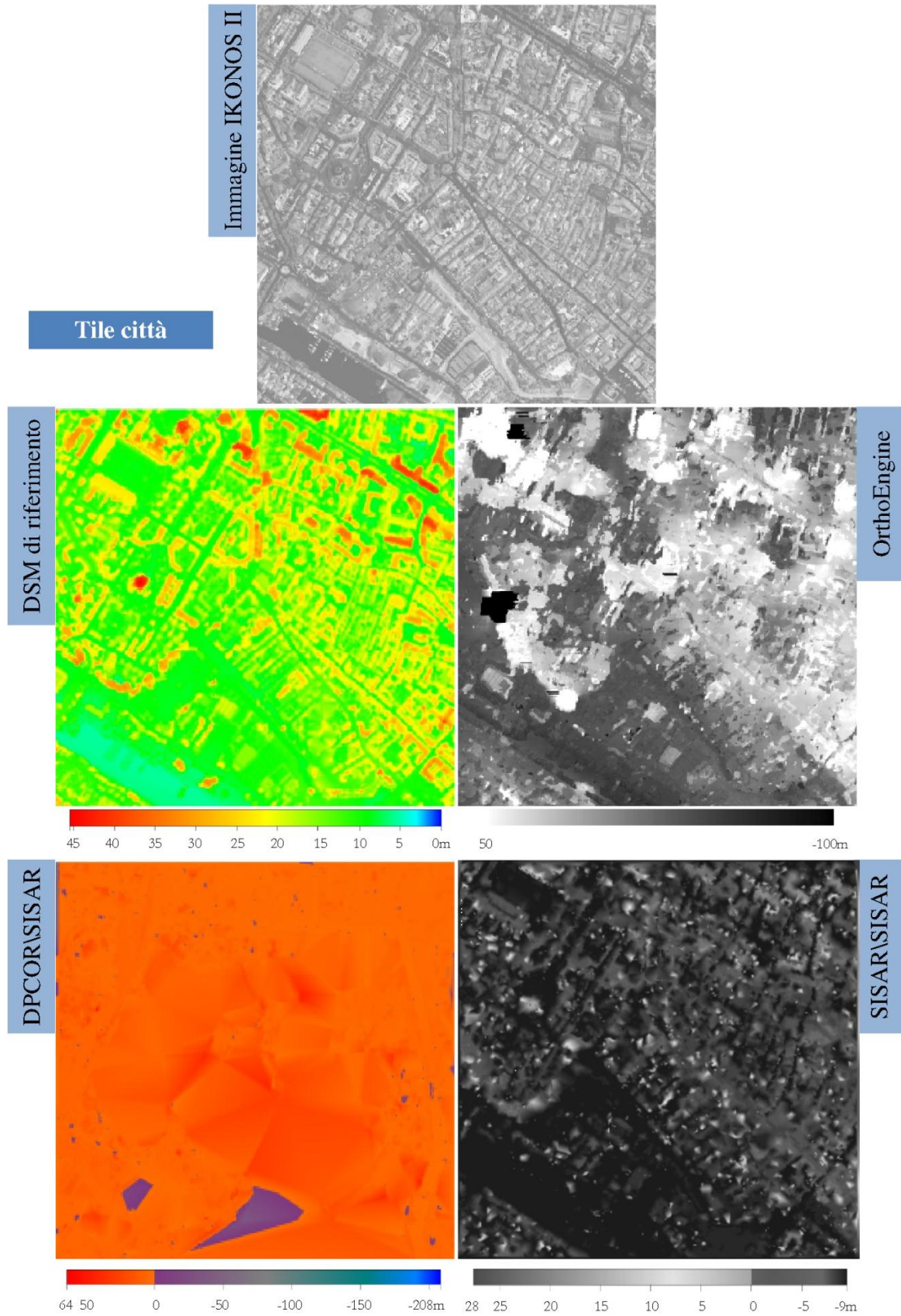


Figura 5-31 - IKONOS II: visualizzazione dei dati di riferimento e dei DMSs estratti per il tile città

5.10.3. *Confronti tra DSM*

Di minor importanza ma comunque interessanti per identificare un eventuale trend, questi confronti tra i DSMs generati con OrthoEngine sono stati condotti in ArcMap eseguendo delle differenze tra un modello assunto come riferimento ed i vari test di estrazione eseguiti durante le prime fasi della sperimentazione.

Finalità principali erano quelle di valutare una possibile dipendenza delle quote del DSM finale da:

- tipo di modello impiegato per l'orientamento (rigoroso o razionale);
- numero e distribuzione dei GCPs.

Poiché al momento dei test non era ancora disponibile il DSM di riferimento dato da AGEA, è stato assunto come riferimento uno dei DSMs creati, eseguendo i seguenti confronti:

Modello	Orientamento	n° GCPs
di riferimento	metodo rigoroso	41
analizzati	metodo rigoroso	20, 26*
	metodo razionale, ordine 0	16, 41
	metodo razionale, ordine 1	16, 41
	metodo razionale, ordine 2	18, 41
di riferimento	metodo razionale, ordine 1	41
analizzati	metodo razionale, ordine 0	16,41
	metodo razionale, ordine 1	16
	metodo razionale, ordine 2	18, 41

*Tabella 5-23 - IKONOS II: riassunto dei confronti tra DSMs eseguiti (per gli orientamenti con RFM estrazioni con il numero di GCPs con cui i residui si stabilizzavano e con l'intero set; *: rispettivamente quello con cui i residui dell'orientamento si stabilizzavano e quello con cui erano minori)*

Con la prima serie di test non si sono riscontrate particolari anomalie né dal confronto con gli altri modelli rigorosi né con le funzioni razionali (mediamente più alta la zona Est e Nord-Est nei modelli rigorosi, Figura 5-32a) analizzando le differenze del metodo rigoroso, si è visto che circa il 92% dei pixel ha residui nell'intervallo $-1 \div 1m$, percentuale che scende al $65 \div 75\%$ con il metodo razionale.

I confronti tra soli modelli creati con il metodo razionale mostrano invece una netta dipendenza dell'andamento globale delle quote dal grado del polinomio e dalla distribuzione dei GCPs: rispetto all'ordine 0 si apprezza una rotazione di quest'ultimo lungo una diagonale dell'immagine, con quote inferiori nella zona Nord-Est (Figura 5-32b); a parità di grado ma con un minor numero di GCPs si nota una rotazione del piano lungo la verticale (Figura 5-32c); infine con l'ordine 2 si apprezza una forma irregolare, con quote del modello di riferimento inferiori in tutta la zona centrale (Figura 5-32d). Le variazioni di quota mostrano comunque differenze nell'intervallo $-1 \div 1m$ per il 93% dei pixel.

Il metodo rigoroso si mostra quindi decisamente più stabile; al contrario, anche in terreni a carattere fortemente pianeggiante la variazione del grado del polinomio nei metodi razionali può comportare trend ed andamenti irregolari della superficie modellata.

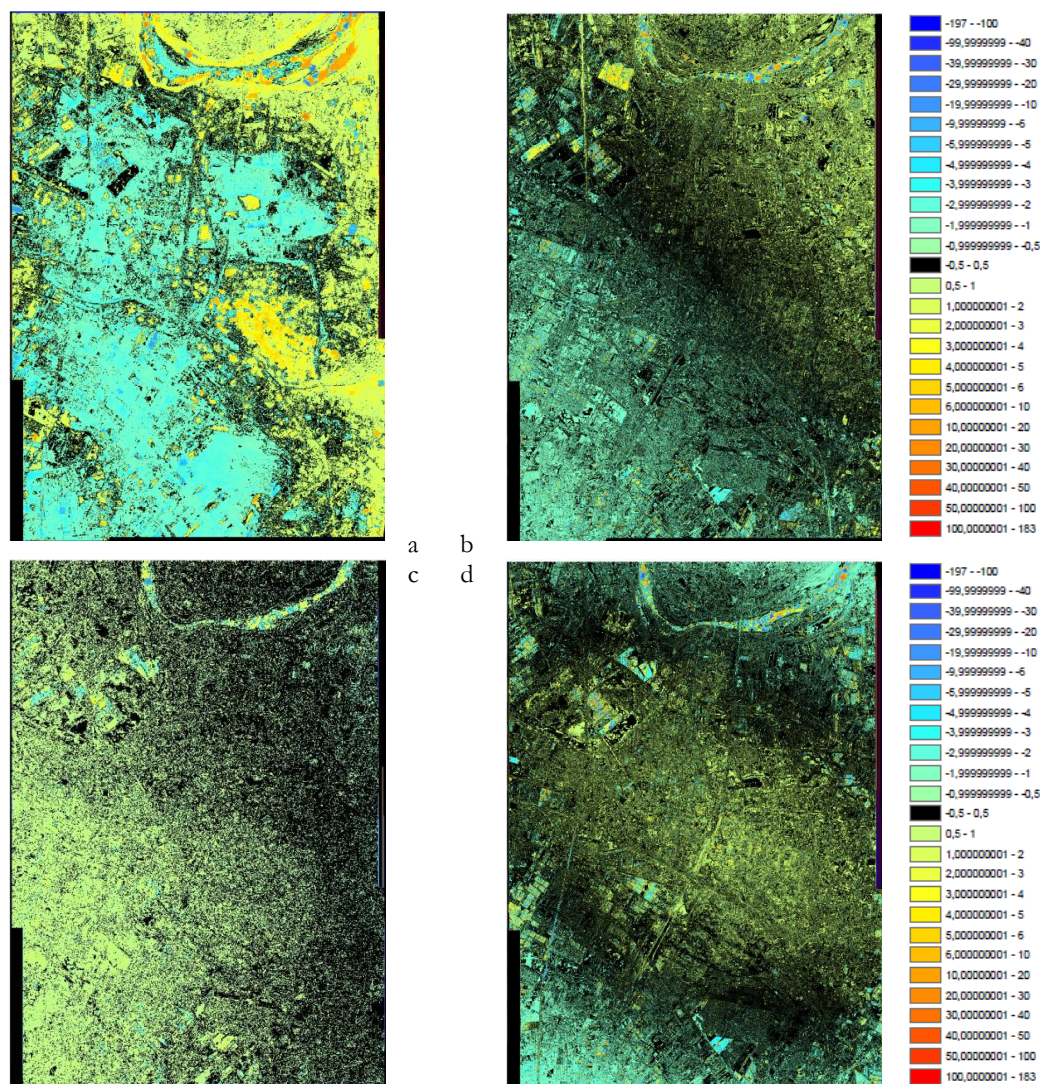


Figura 5-32 - IKONOS II: differenze tra i DSMs generati con OrthoEngine al variare del modello d'orientamento e del numero di GCPs: modello di riferimento rigoroso (a), modello di riferimento razionale ordine 1 e modelli analizzati razionali di ordine 0 (b), ordine 1 (c), ordine 2(d)

5.10.4. Estrazione di profili

Per confrontare ulteriormente i diversi modelli derivanti da OrthoEngine e per valutare il grado di approssimazione introdotto all'aumentare della dimensione del pixel, durante la prima fase delle elaborazioni sono stati infine estratti quattro profili, 2 orizzontali e 2 verticali, che attraversassero sia zone edificate che rurali (Figura 5-33).



Figura 5-33 - IKONOS II: posizione dei profili estratti

I test, condotti sia sui modelli generati a partire da un orientamento eseguito con metodo rigoroso che con funzioni razionali, hanno dato risultati analoghi. Le differenze eseguite sono state:

- per ogni modello, differenze tra i DSM estratti a passo 1, 2, 4m;
- per ogni passo di estrazione, differenze tra i modelli estratti con diverso numero di GCPs e metodo di orientamento.

I residui medi sono risultati di pochi centimetri, con differenze massime anche di oltre 20m e deviazioni standard fino a $\pm 2m$. In generale gli andamenti sono risultati paragonabili per entrambe le prove condotte, con variazioni solo nei residui massimi: i modelli a passo 1m sono risultati i più rumorosi, mentre gli errori limite tra quelli a 2 e 4m sono risultati solitamente di alcuni metri inferiori. In nessuna prova, come mostrato già dai confronti tra DSMs del paragrafo precedente, è stato trovato un sistematismo: non si sono avuti né modelli con bias evidenti né modelli con specifici problemi ad esempio in funzione della copertura del suolo, ma tutti i profili dei residui nei grafici creati hanno un andamento casuale.

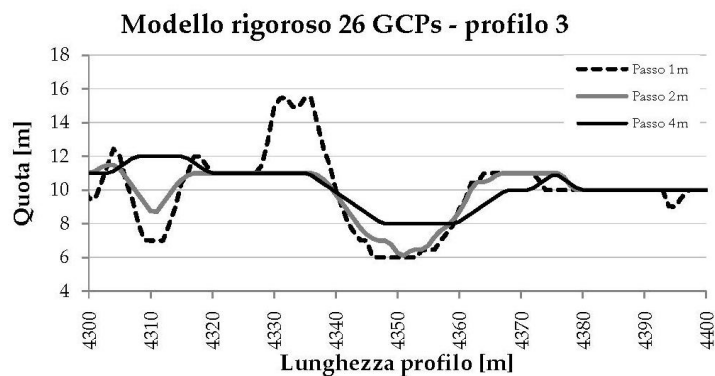


Figura 5-34 - IKONOS II: confronti tra i profili estratti per lo stesso modello al variare del passo della griglia

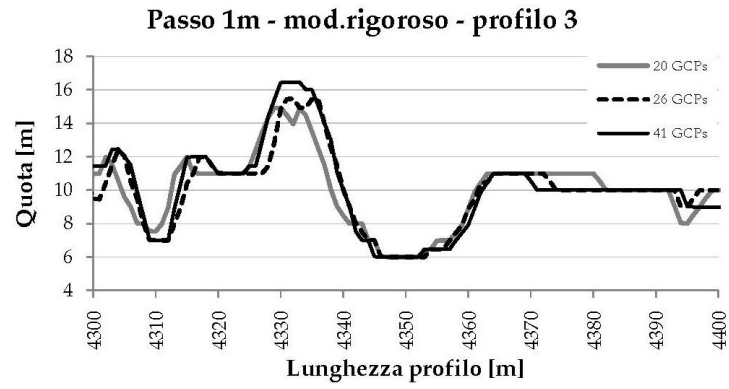


Figura 5-35 - IKONOS II: confronti tra i profili estratti da 3 modelli generati con un diverso numero di GCPs a parità di passo di griglia

6. Prove di estrazione da stereocoppia GeoEye-1

6.1. Caratteristiche della stereocoppia

Avute le prime indicazioni dalle elaborazioni appena descritte ed effettuate sui dati IKONOS II, si è testata anche una stereocoppia GeoEye-1 al fine di valutare i vantaggi derivanti dalla miglior risoluzione spaziale di tale sensore (GSD di 0.41m e 1.65m rispettivamente nel pancromatico e nel multispettrale). Per tale motivo nel luglio 2009 è stata ordinata una stereocoppia (immagini pancromatiche e multispettrali) sull'area di Argenta (FE), acquisita in data 28 marzo 2010 e consegnata nei primi giorni di aprile. L'elevato lasso di tempo intercorso tra richiesta ed acquisizione è dovuto a problemi di copertura nuvolosa sull'area richiesta per il mese di agosto, poi ad accumulo di ordini derivanti da problemi avuti dal sensore a bordo nell'arco dell'autunno.



Figura 6-1 - GeoEye-1: stereocoppia dell'area di Argenta (FE)

Le immagini, rappresentate in Figura 6-1, sono state acquisite in modalità in-track e fornite ricampionate a 0.5m per le pancromatiche e 2m per le multispettrali. Le principali caratteristiche, contenute nel file metadata, sono riportate in Tabella 6-1. Basandosi su tali valori, in Figura 6-2 sono state schematizzate la geometria di acquisizione della stereocoppia e la posizione del sole.

Dettaglio	Valore
Acquisition date	28-03-2010
Processing level	Standard Geometrically Corrected
Bits per pixel per band	11bits
Scan direction	Reverse
Percent cloud cover	0%
Intersection angle	46°.4784
B/H	0.8
Pixels (rows x columns)	16604x23804

Dettaglio	Prima immagine	Seconda immagine
Acquisition time	10.21 GMT	10.20 GMT
Acquired	PAN cross scan	0.51m
	PAN along scan	0.49m
Nominal GSD	MS cross scan	2.03m
	MS along scan	1.79m
Scan azimuth	1°.11	359°.68
Nominal collection azimuth	229°.5155	309°.1042
Nominal collection elevation	61°.51207	72°.00957
Sun angle azimuth	159°.2959	158°.9901
Sun angle elevation	46°.61131	46°.55763
Camera-Target-Sun	70°.2196	150°.1141

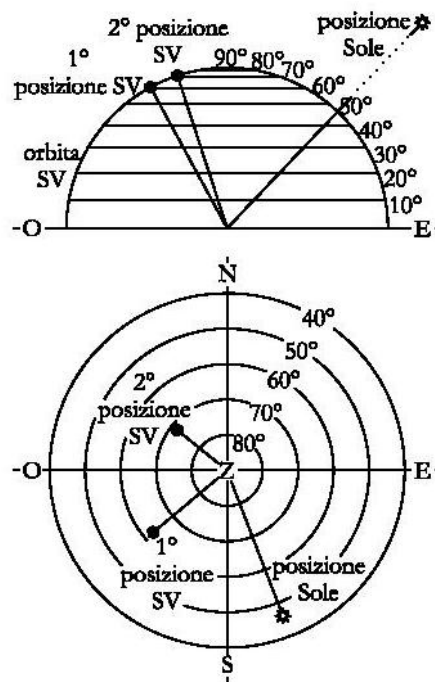


Tabella 6-1 - GeoEye-1: caratteristiche della stereocoppia: nella prima tabella sono riportate le proprietà comuni alle due immagini; nella seconda tabella sono indicate le proprietà delle singole immagini

Figura 6-2 - GeoEye-1: geometria di acquisizione della stereocoppia e posizione del sole

L'area acquisita ha un'estensione di circa 12Km in larghezza ed 8.5Km in altezza ed è a carattere fortemente pianeggiante, con quote terreno che variano nell'intervallo -3.5÷8m sul livello medio mare Genova 1942. Essa comprende un'area quasi totalmente rurale, come visibile in Figura 6-3: sono presenti il paese di Argenta (FE), un tratto dell'argine del fiume Reno a sud del paese, altri piccoli centri abitati e borgate di edifici, parte delle Valli di Campotto nella parte Sud-Ovest, mentre il resto dell'area è costituito da edifici isolati e da terreno ad uso agricolo (in prevalenza campi nudi o con manto erboso).

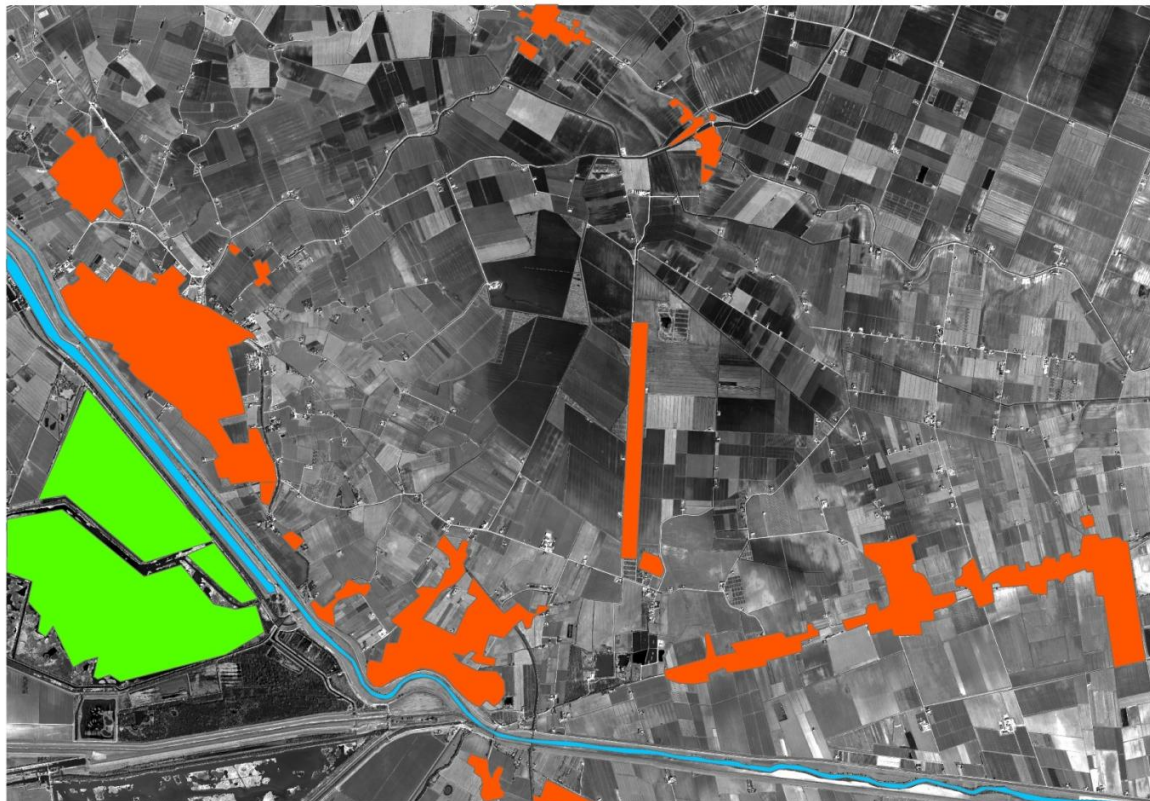


Figura 6-3 - GeoEye-1: copertura del suolo dell'area acquisita

Tale area è stata scelta per via di una collaborazione con il Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara, che sta eseguendo un'analisi sul rischio di inondazione nelle aree territoriali del tratto vallivo del bacino del del fiume Reno, in particolare per quanto riguarda il Comune di Argenta (FE), per individuare i tratti critici ed analizzare il potenziale rischio di esondazione in termini di livelli e velocità di deflusso sul territorio. Come detto, l'area è fortemente pianeggiante, per cui potrebbe essere descritta con un numero ridotto di punti; al contrario, risultano di primaria importanza la conformazione e la posizione di tutti i rilevati e le barriere che possono fungere da difesa dei centri abitati od originare aree di accumulo, identificando anche diverse micro celle. Le simulazioni si basano su un accurato modello digitale del terreno realizzato con tecniche GNSS (§6.6.5), per cui è stato possibile effettuare ulteriori test inserendo come input anche il modello estratto dalla stereocoppia. In realtà, come si può vedere in Figura 6-4, l'immagine acquisita coincide con la parte centrale della cella idraulica, ma ciò non ha creato problemi in quanto le due porzioni di estremità non venivano interessate da allagamento durante le simulazioni previste (in esse è stato lasciato come input il modello derivato dal rilievo GNSS).

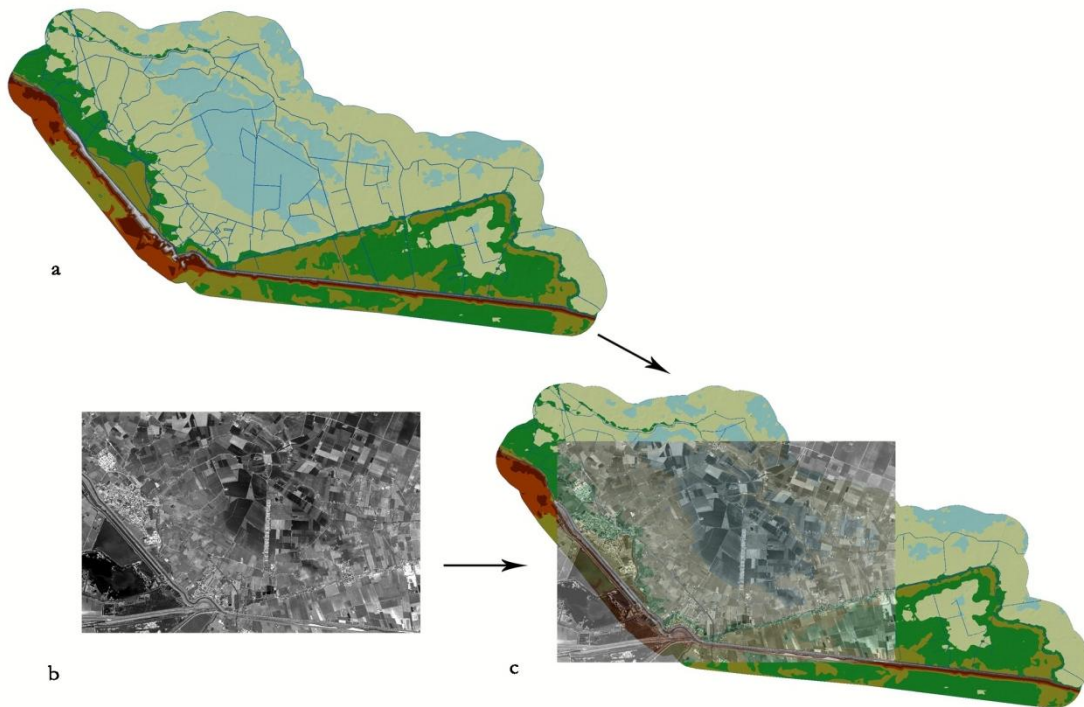


Figura 6-4 - GeoEye-1: cella idraulica definita dal Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara (a), immagine satellitare (b), sovrapposizione delle due per visualizzare l'area comune (c)

In Figura 6-5 è infine riportato un dettaglio delle due immagini raffigurante il centro di Argenta: nonostante le immagini siano state acquisite alle 11.30 circa, a causa della data le ombre dovute agli edifici sono comunque rilevanti, tanto che le strade più strette risultano completamente in ombra.



Figura 6-5 - GeoEye-1: dettaglio del centro di Argenta

6.2. Rilievo ed elaborazione dei GPs

Prima operazione è stata il rilievo dei GPs: osservate le immagini sono stati identificati circa 40 possibili punti, prevalentemente su incroci, parcheggi e ponti (dato il carattere rurale dell'area in diversi casi si è stati infatti costretti a rilevare la mezzeria di piccoli ponti tra capezzagne e campi coltivati).

Il rilievo è stato condotto utilizzando il ricevitore a doppia frequenza TOPCON GR3, collegandosi alla rete di stazioni permanenti SoGER attraverso internet con protocollo Ntrip con tempi di acquisizione di 60-120sec, in quanto precedenti test avevano mostrato l'affidabilità della procedura [37].



Figura 6-6 - GeoEye-1: rilievo dei GPs

Le operazioni di misura si sono protratte per 4 giorni (22-28-29 aprile e 4 maggio): data l'impossibilità in taluni casi di rilevare i punti approssimativamente identificati in laboratorio, si sono cercati punti nelle immediate vicinanze (per non alterare la distribuzione omogenea stabilita inizialmente) che fossero sufficientemente chiari anche sulle immagini (controllando in tempo reale sulle immagini stesse nei casi più complessi). In tutto sono state così acquisite le coordinate di 80 punti, cui sommare quelle dei 6 vertici IGM95 più prossimi all'area acquisita (Figura 6-7) battuti come verifica sulla qualità dei rilievi eseguiti.

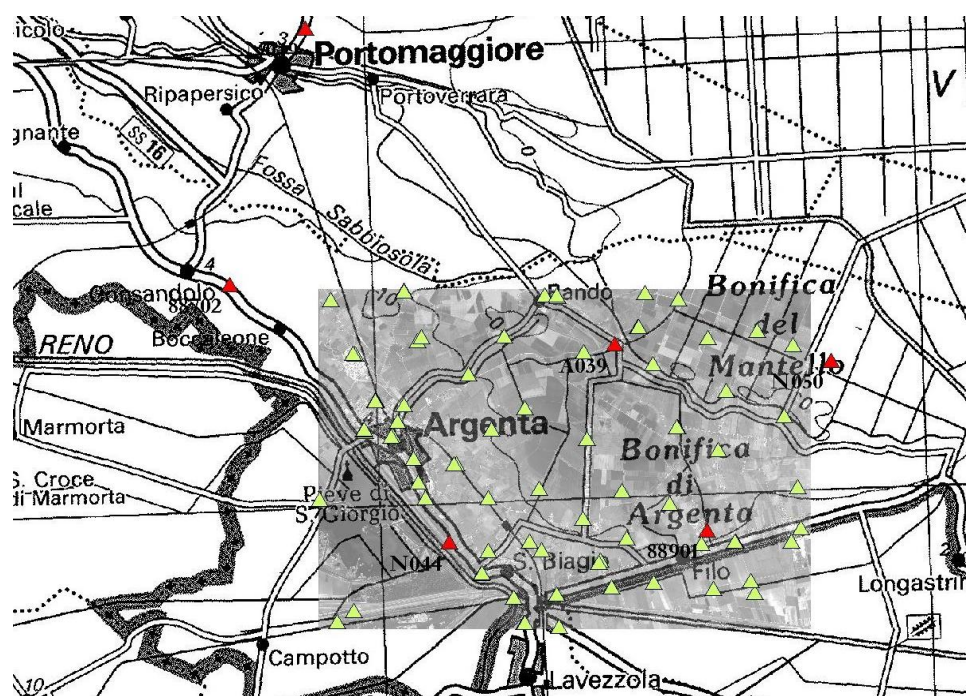


Figura 6-7 - GeoEye-1: immagine acquisita, posizione dei GCPs (▲) e dei vertici della rete IGM95 più prossimi (▲)

Mediante il software VERTO3 è stato quindi possibile anche in questo caso ottenere le coordinate dei punti sia nel sistema ED50 che in quello WGS84, oltre a trasformare la quota da ellissoidica ad ortometrica.

Successivamente è stato effettuato il riconoscimento dei punti sulle immagini sfruttando il software OrthoEngine. Agli 80 punti rilevati è stato aggiunto anche il vertice IGM 88901, in quanto posizionato sulla copertura di una cabina elettrica facilmente identificabile nell'immagine. Tale operazione è stata condotta da tre operatori; confrontando poi le coordinate immagine così ricavate sono stati corretti i punti riconosciuti in maniera errata da ciascuno dei tre (soprattutto per i punti in zone coltivate il riconoscimento non è stato sempre concorde): i risultati dei confronti sono riassunti in Tabella 6-2. Il confronto mostra differenze superiori a mezzo pixel per il 25-30% dei dati, con miglior accordo tra gli operatori 1 e 3, per i quali si ha solo una coordinata che differisce di più di un pixel; al contrario, nei confronti con l'operatore 2 si notano scostamenti superiori al pixel in percentuale maggiore, tra cui solo il punto 75 è risultato chiaramente mal posizionato. Da tale analisi si è inoltre deciso di eliminare dalle successive elaborazioni i punti 9, 33, 61, in quanto difficili da riconoscere in maniera sufficientemente precisa.

	Operatore: 3-2				Operatore: 3-1				Operatore: 2-1			
	Imm_000		Imm_001		Imm_000		Imm_001		Imm_000		Imm_001	
	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L
Media [px]	0.020	-0.084	-0.059	0.082	0.038	-0.038	0.045	0.023	0.018	0.046	0.104	-0.059
StDev [px]	0.499	0.620	0.569	0.560	0.391	0.437	0.457	0.514	0.507	0.611	0.443	0.579
RMSE [px]	0.499	0.625	0.572	0.566	0.393	0.439	0.459	0.515	0.507	0.613	0.455	0.582
Min [px]	-1.38	-1.64	-1.75	-1.34	-0.96	-0.94	-1.00	-0.94	-1.50	-1.63	-1.31	-2.06
Max [px]	1.25	1.94	1.88	2.19	0.81	0.94	2.09	1.00	1.25	1.69	1.50	1.25
Diff. 0.5-1 [%]	13.6	16.0	19.8	34.6	21.0	32.1	24.7	40.7	19.8	21.0	22.2	21.0
Diff. >1 [%]	11.1	13.6	7.4	4.9	0.0	0.0	1.2	0.0	8.6	11.1	2.5	8.6

Tabella 6-2 - GeoEye-1: riassunto del confronto sul riconoscimento dei GPs effettuato dai tre operatori

Dato che inizialmente si era deciso di eseguire i test sull'orientamento con circa 40 punti e che in alcune zone dell'immagine essi sono stati acquisiti vicini gli uni agli altri per ovviare a possibili problemi di riconoscimento sull'immagine di alcuni di essi, i 78 punti a disposizione sono stati divisi in due gruppi: 38 sono stati usati come CPs in tutti i test di orientamento eseguiti (Figura 6-8, a destra), mentre i restanti 40 (Figura 6-8, a sinistra) sono stati impiegati come GCPs eseguendo diversi test di orientamento incrementandone progressivamente il numero.

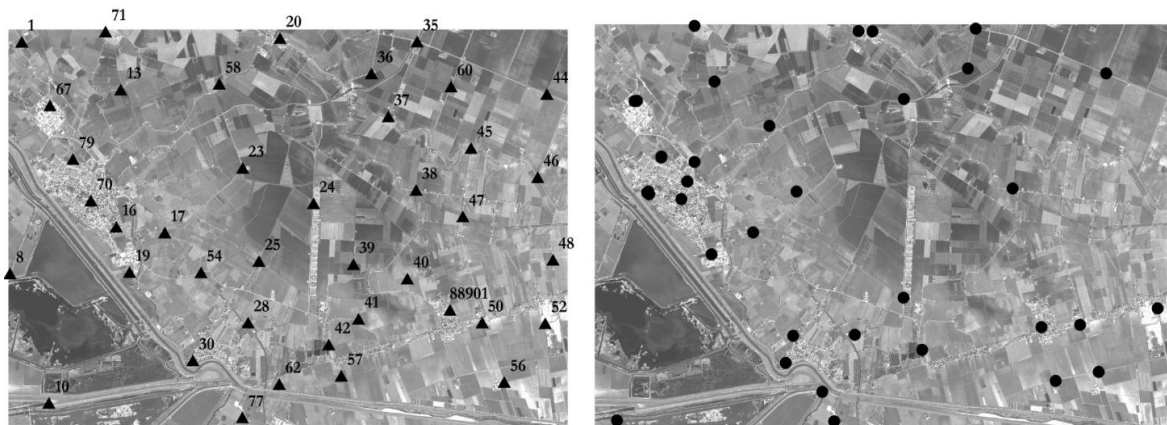


Figura 6-8 - GeoEye-1: distribuzione dei GCPs (sinistra) e dei CPs (destra)

6.3. Orientamento con GCPs

Anche in questo caso i test per valutare il numero minimo di GCPs con il quale si ottiene una stabilizzazione dei residui sui punti di controllo sono stati condotti sia impiegando il modulo OrthoEngine del pacchetto software PCI Geomatica (a differenza delle prove con IKONOS II si è impiegata la versione 10.3) che SISAR.

Sempre per l'impossibilità di valutare i residui sulla stereocoppia con OrthoEngine sono stati eseguiti solamente test con il modello rigoroso, mentre con SISAR sia impiegando il modello rigoroso che il RFM. In tutti i casi si sono inserite tolleranze sulle coordinate terreno dei punti di 0.1m e sulle coordinate immagine di 0.5 pixel.

Con il set costituito da 40 punti, partendo da 6 GCPs distribuiti in maniera omogenea sulle immagini, sono stati eseguiti 18 test incrementandone il numero con step di 2 alla volta (utilizzando i restanti punti come CPs) sempre cercando di avere la miglior distribuzione. In particolare, l'ordine in cui sono stati aggiunti è riportato in Tabella 6-3.

	Elaborazioni																	
	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
n° GCPs	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
ID	1, 10, 20,	17	28	79	23	8	13	30	41	24	25	52	19	50	35	42	36	16
	44, 56, 77	47	60	88901	39	48	57	45	70	54	37	71	46	58	62	67	40	38

Tabella 6-3 - GeoEye-1: ID dei 6 GCPs usati per il primo test ed elenco dell'ordine di inserimento dei restanti GCPs in tutti i test eseguiti con la distribuzione 1

Per valutare quanto la distribuzione dei punti influenzi i residui dell'orientamento, è stata identificata anche una seconda distribuzione di GCPs, in modo da eseguire test speculari rispetto a quelli con la precedente. L'ordine con cui sono stati aggiunti in questo caso i GCPs è riportato in Tabella 6-4.

	Elaborazioni																	
	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
n° GCPs	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
ID	1, 10, 44	8	24	35	41	23	16	13	30	52	19	28	71	20	50	17	25	38
	56, 58, 62	48	54	79	47	88901	45	57	60	67	46	36	77	42	70	37	40	39

Tabella 6-4 - GeoEye-1: ID dei 6 GCPs usati per il primo test ed elenco dell'ordine di inserimento dei restanti GCPs in tutti i test eseguiti con la distribuzione 2

Tutti i risultati sono riportati riassuntio nei grafici sottostanti, mentre i dati con i residui dei singoli orientamenti sono riportati in Appendice A.IV.3.

6.3.1. Orientamento con modello rigoroso: OrthoEngine v.10.3

A causa di problemi di instabilità del programma, il test con 6 GCPs non è stato eseguito.

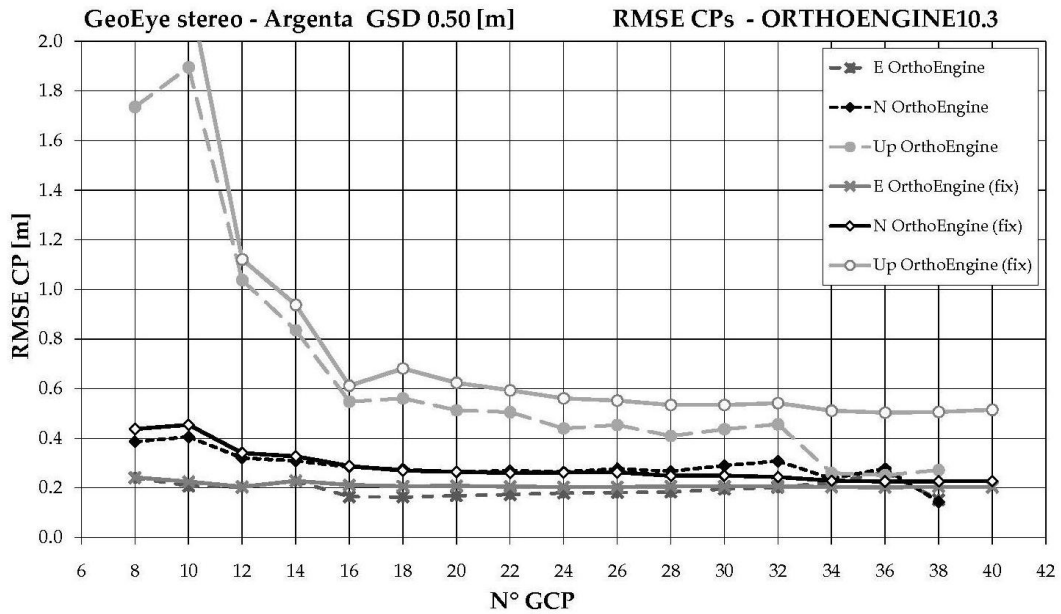


Figura 6-9 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei CPs, OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 1

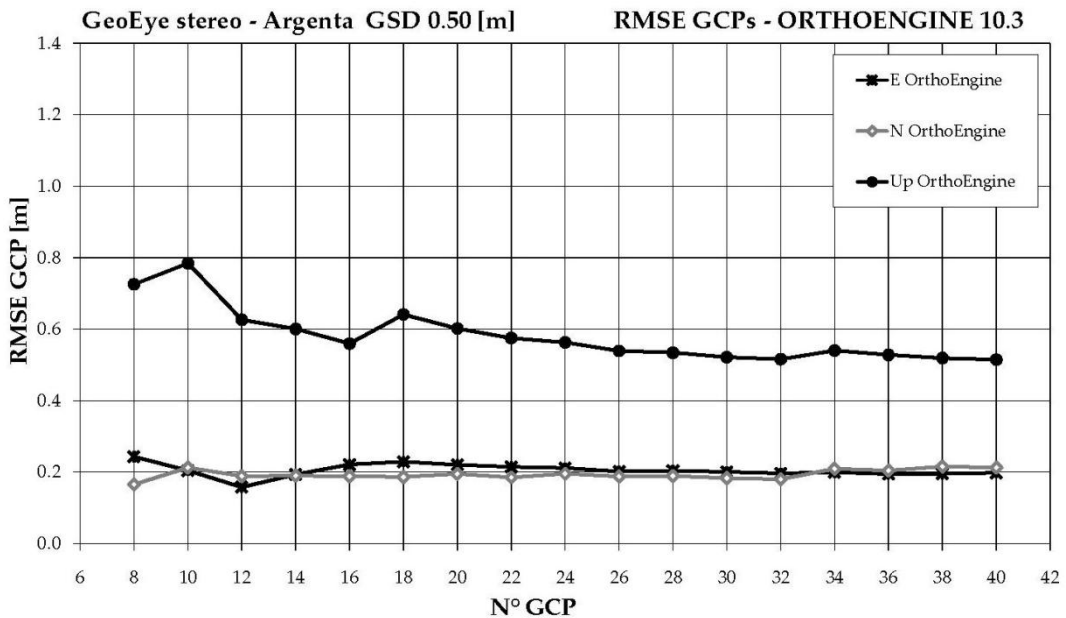


Figura 6-10 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei GCPs, OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 1

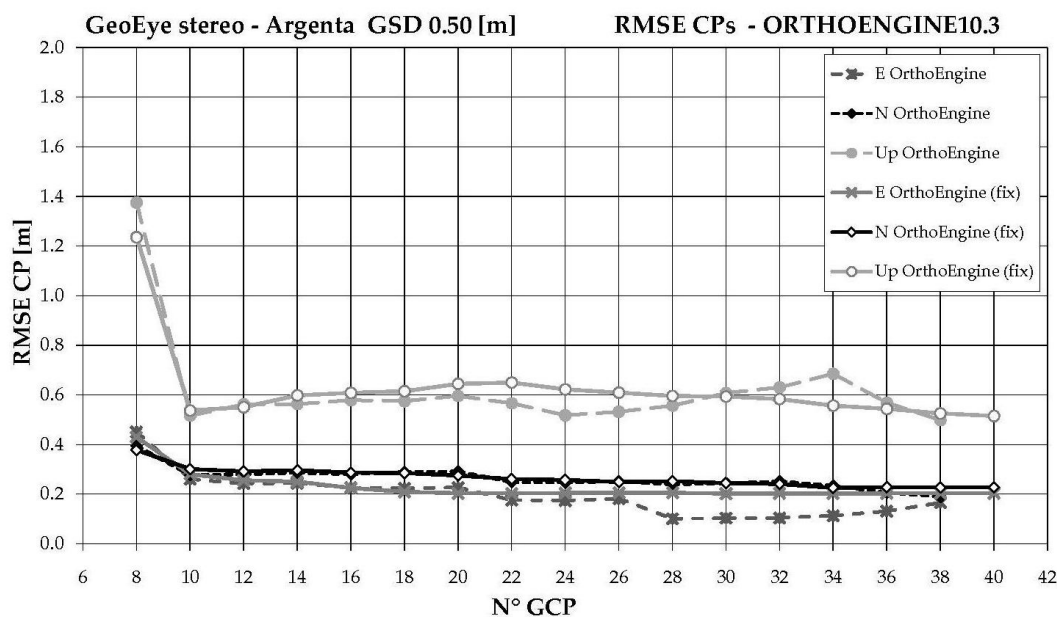


Figura 6-11 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei CPs, OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 2

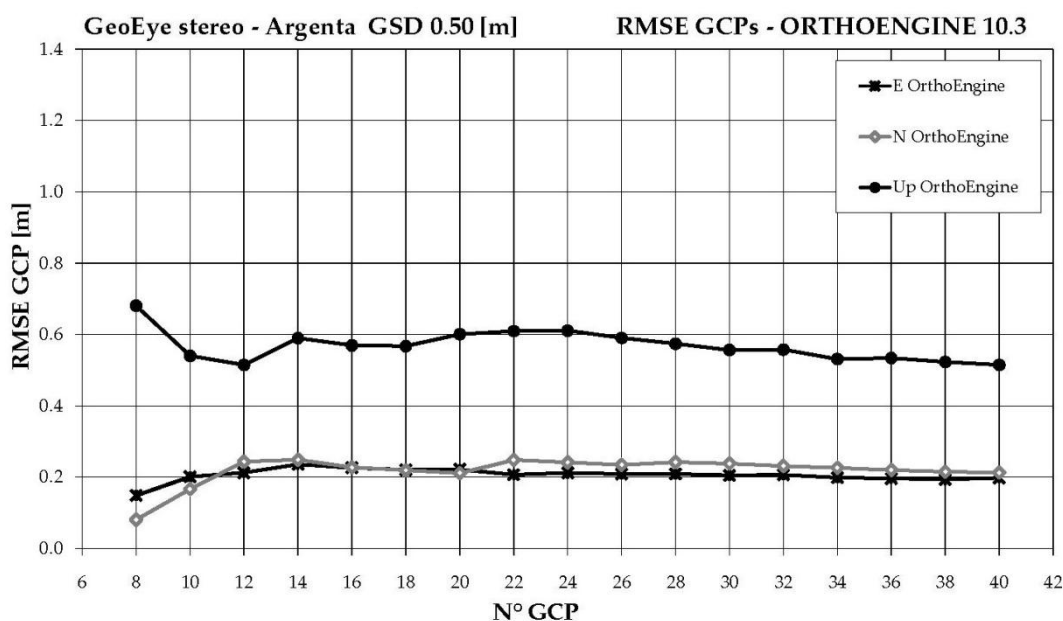


Figura 6-12 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei GCPs, OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 2

2

Si può notare come le due distribuzioni diano risultati nel complesso analoghi: nel primo caso (Figura 6-9) una stabilizzazione dei residui sui CPs si ottiene a partire da 16 GCPs, mentre nel secondo caso (Figura 6-11) già con 10 punti si ottengono buoni risultati; in particolare, i valori dei residui in Est e Nord sono praticamente identici (compresi tra 0.2-0.3m), mentre in Up con la prima distribuzione si ottengono, all'aumentare dei GCPs, residui via via decrescenti ed inferiori rispetto a quelli della seconda distribuzione (compresi tra 0.5-0.55m nel primo caso e circa di 0.1m peggiori nel secondo), che ha però un andamento più omogeneo in tutti i test. Del tutto influenti risultano

invece le modifiche alla distribuzione per quanto riguarda i GCPs (Figura 6-10 e Figura 6-12), i cui residui si mantengono sempre di circa 0.2m in E e N e nell'intervallo 0.5-0.6m in Up.

In questo primo caso gli orientamenti con la prima distribuzione dei GCPs sono stati eseguiti anche con le coordinate immagine riconosciute dagli altri due operatori, al fine di valutare quanto incide sull'orientamento il riconoscimento dei punti sulle immagini:

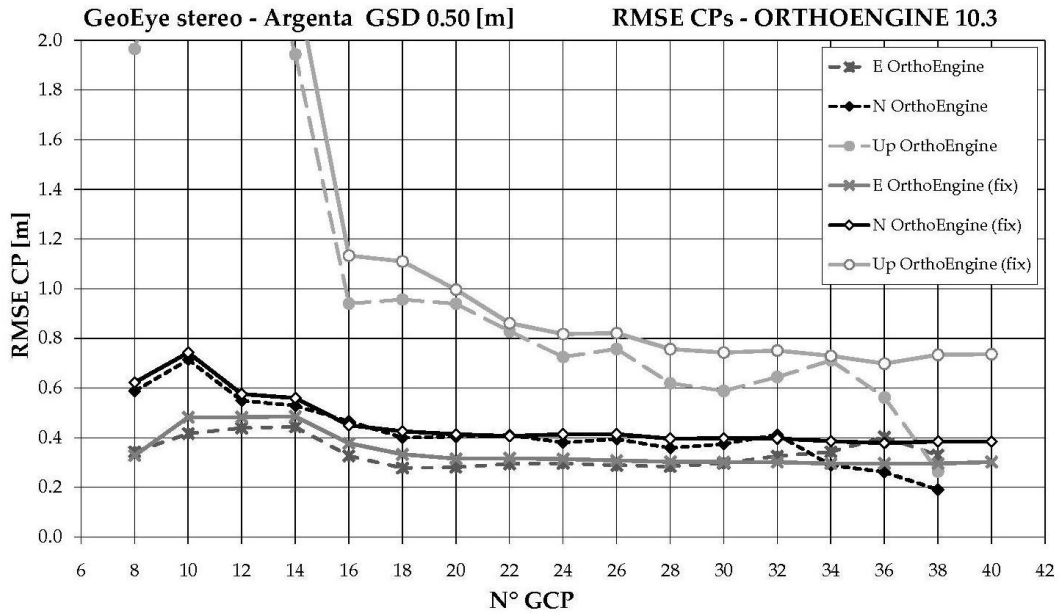


Figura 6-13 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei CPs, OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 1, operatore 2

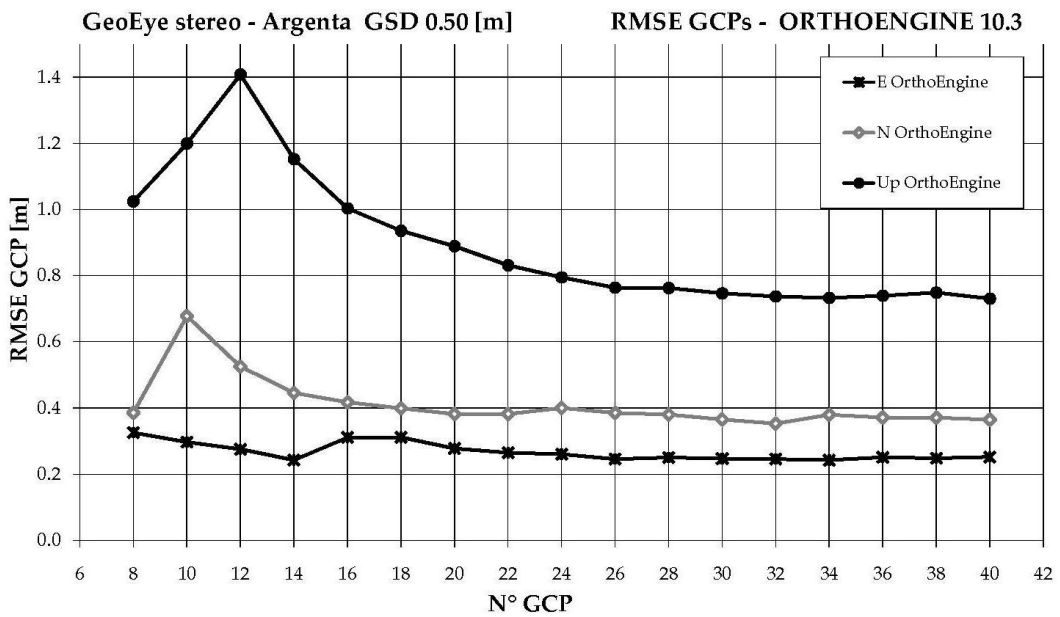


Figura 6-14 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei CPs, OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 1, operatore 2

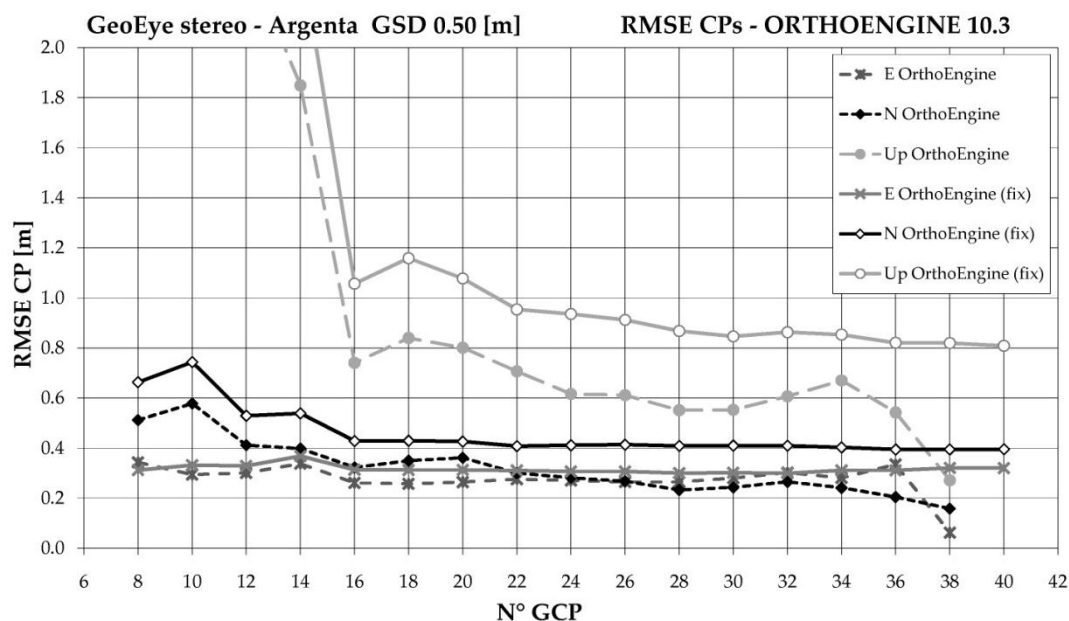


Figura 6-15 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei CPs, OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 1, operatore 3

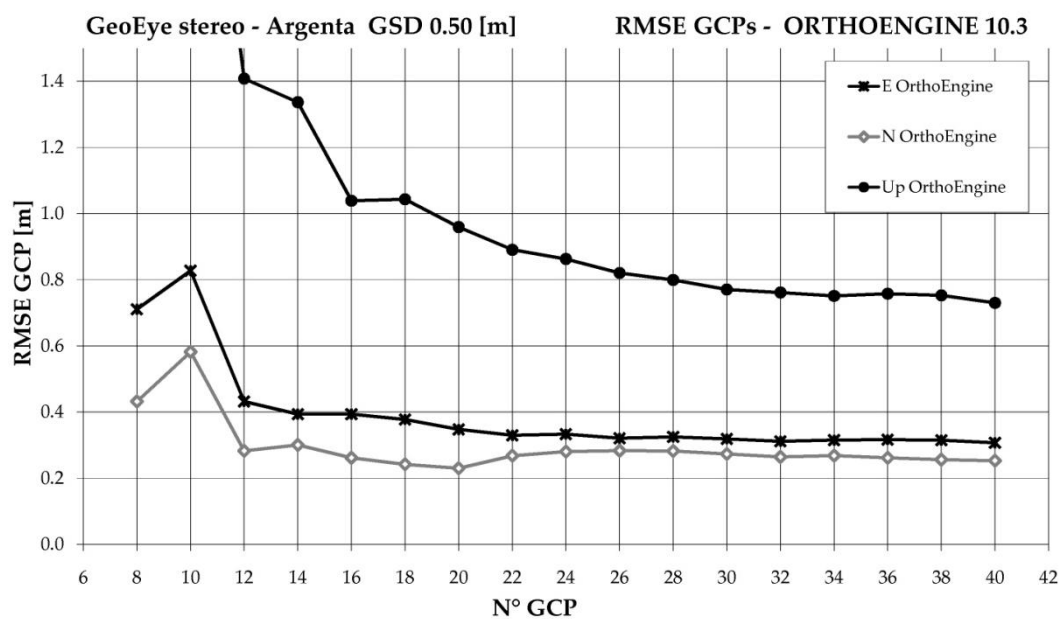


Figura 6-16 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei GCPs, OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 1, operatore 3

I grafici ottenuti mostrano un andamento con residui maggiori in tutte le direzioni sia per quanto riguarda i CPs (Figura 6-13) che i GCPs (Figura 6-14): in particolare, la stabilizzazione dell'accuratezza in direzione Up è molto più irregolare e comunque mai inferiore alle dimensioni del pixel. Per i GCPs, inoltre, anche i residui sulle coordinate planimetriche si discostano tra loro, a differenza di quanto mostrato nelle altre elaborazioni. Nonostante quindi le differenze tra le coordinate immagine riconosciute dagli operatori non fossero elevate (in particolare tra gli operatori 1

e 3), il software ha mostrato una forte sensibilità a tale parametro, fornendo risultati mediocri soprattutto in direzione Up.

6.3.2. Orientamento con modello rigoroso: SISAR

Per la prima distribuzione si ha:

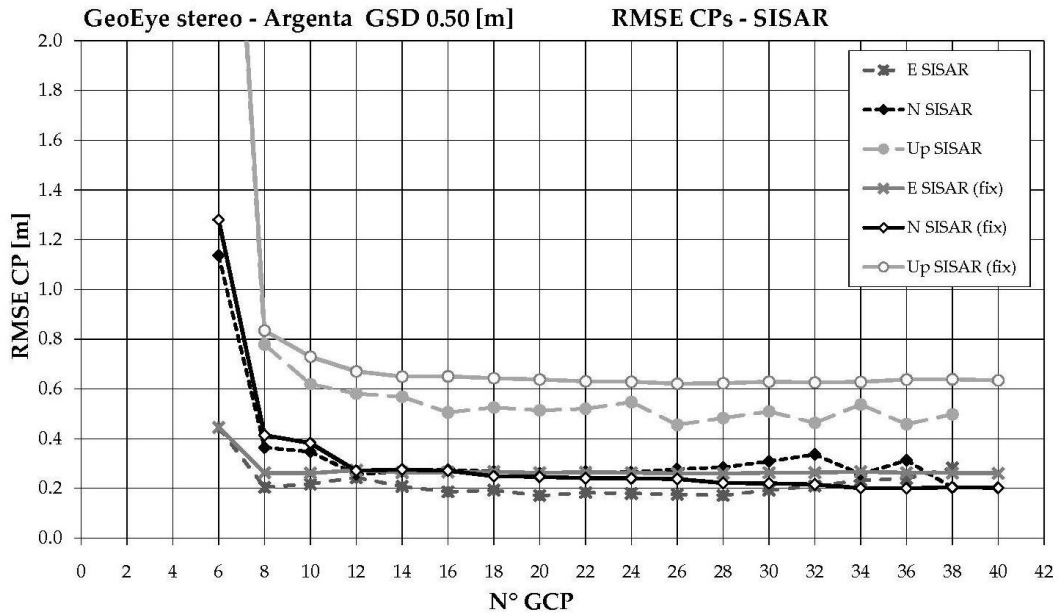


Figura 6-17 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei CPs, SISAR, modello rigoroso, distribuzione 1

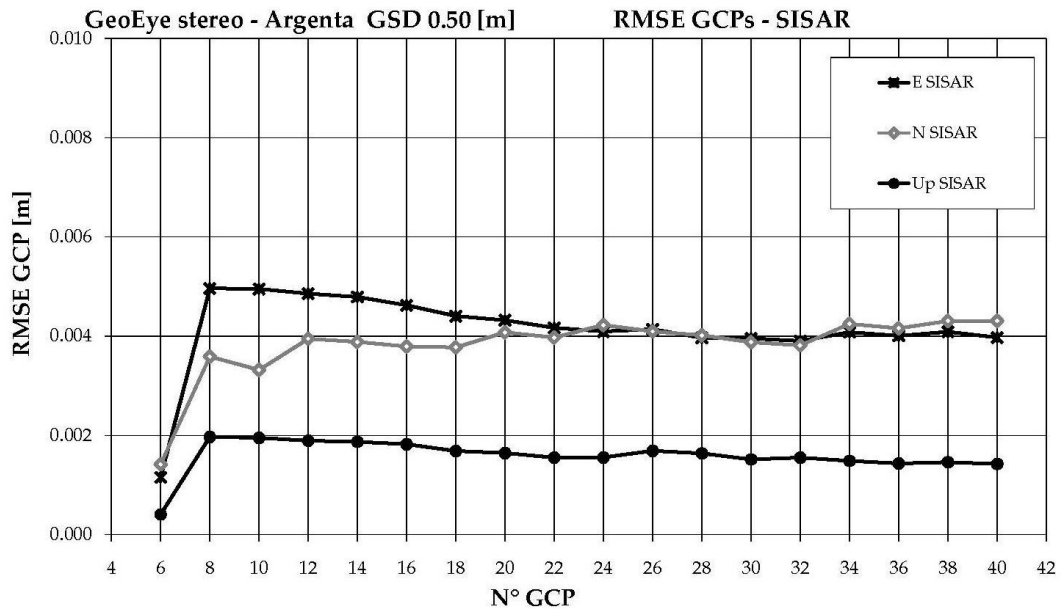


Figura 6-18 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei GCPs, SISAR, modello rigoroso, distribuzione 1

Per la seconda distribuzione:

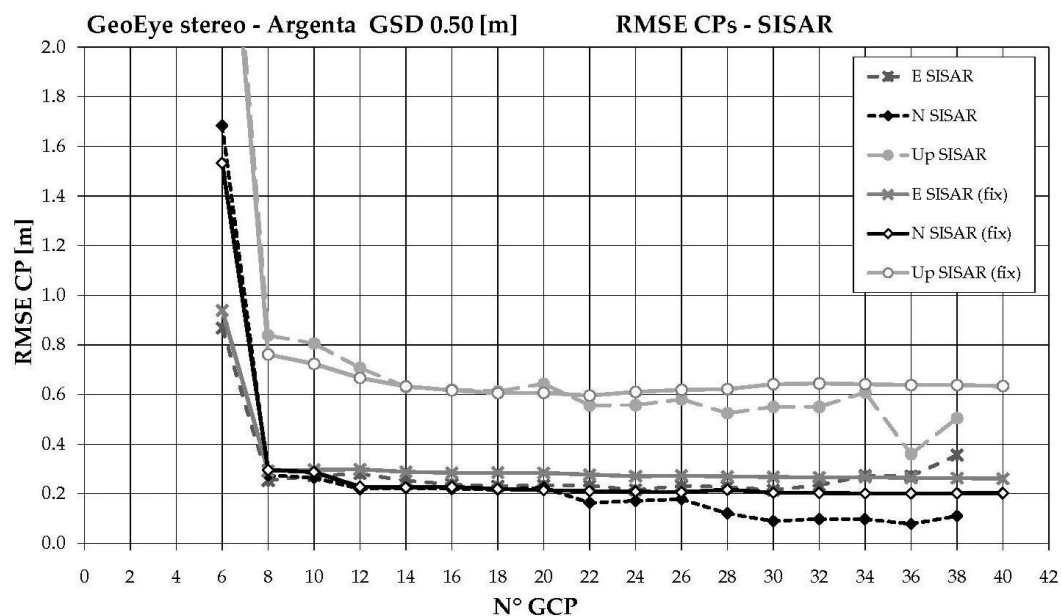


Figura 6-19 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei CPs, SISAR, modello rigoroso, distribuzione 2

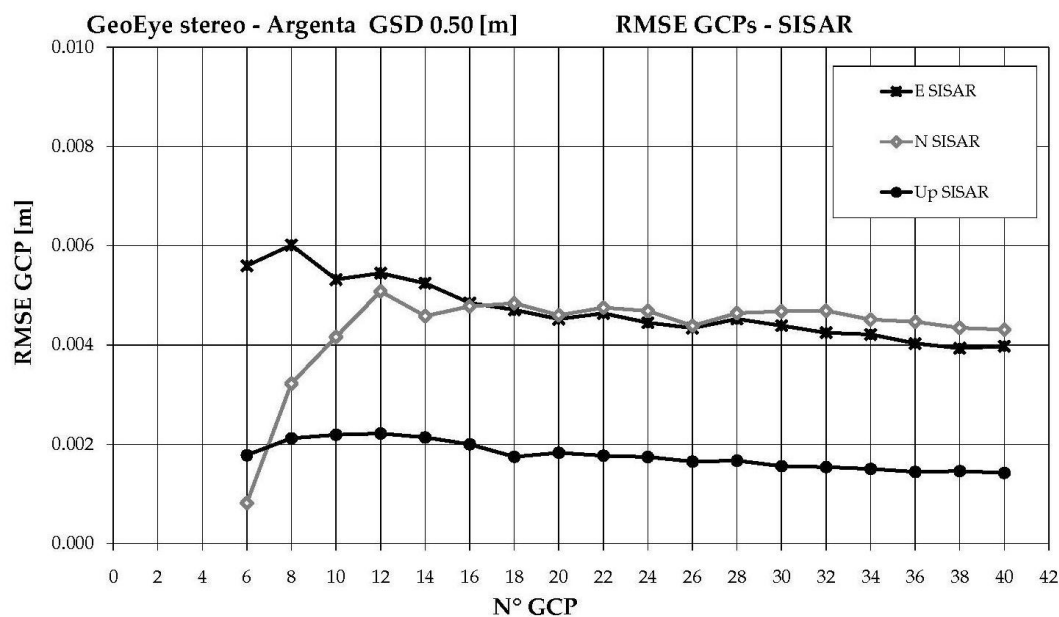


Figura 6-20 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei GCPs, SISAR, modello rigoroso, distribuzione 2

In questo caso il confronto tra le due distribuzioni mostra un andamento molto simile, con una stabilizzazione dei residui sui CPs a partire da 12-14 GCPs (Figura 6-17 e Figura 6-19). I valori dei residui in Est e Nord sono del tutto paragonabili a quelli derivanti dai test con OrthoEngine (anche in questo caso dunque compresi tra 0.2-0.3m), mentre in Up dal confronto tra i due software si notano in questo caso residui leggermente più elevati, con valori compresi nell'intervallo 0.5-0.65m. I residui sui GCPs sono paragonabili in entrambe le distribuzioni e del tutto ininfluenti (Figura 6-18 e Figura 6-20).

Per valutare l'influenza del riconoscimento delle coordinate immagine, si riportano i risultati delle prove di orientamento ottenute con le coordinate riconosciute dall'operatore 2:

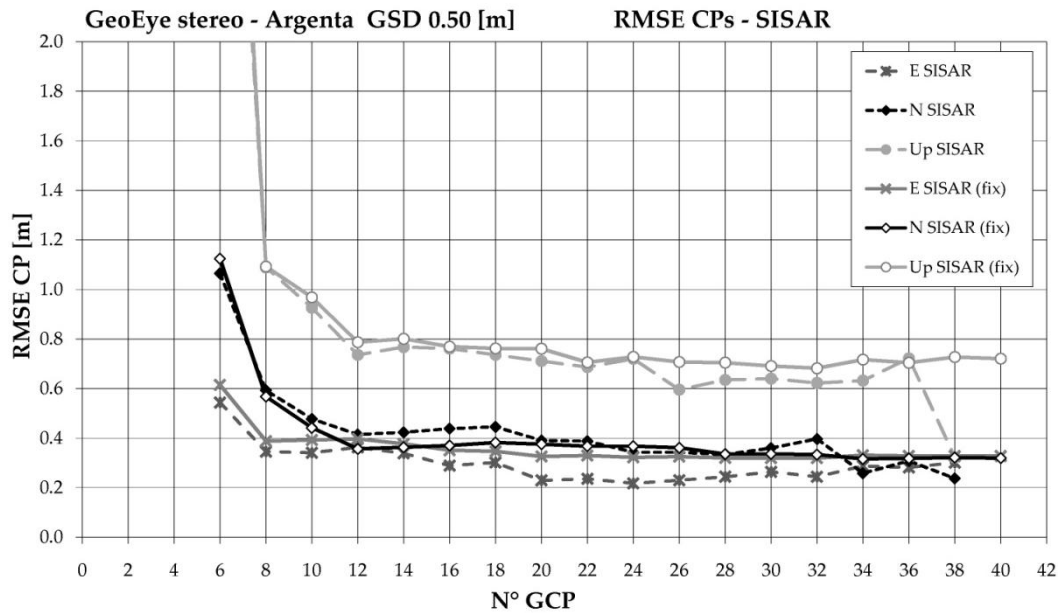


Figura 6-21 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei CPs, SISAR, modello rigoroso, operatore 2

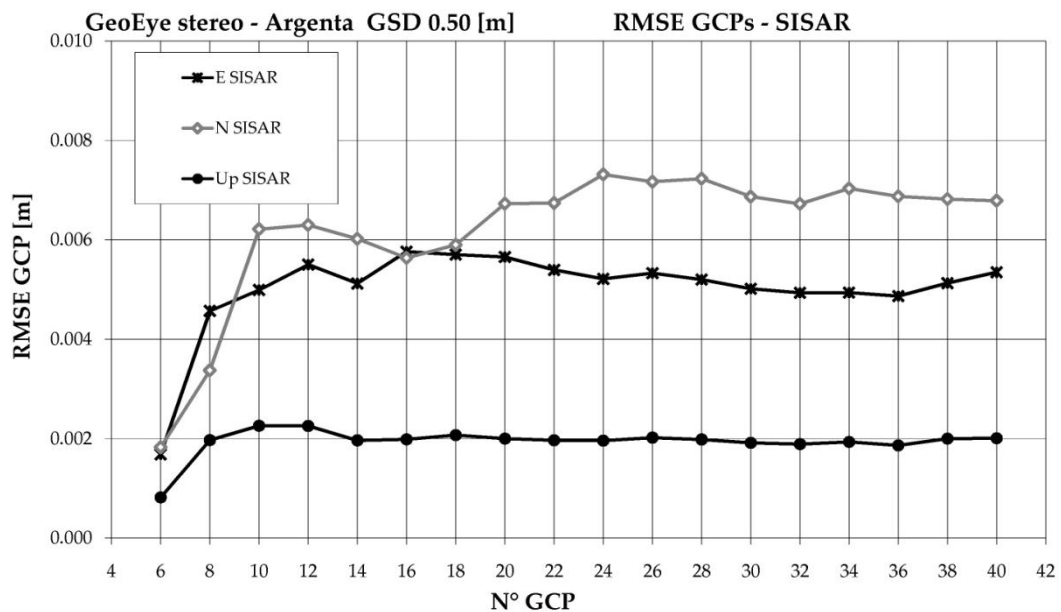


Figura 6-22 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei GCPs, SISAR, modello rigoroso, operatore 2

Il grafico relativo ai residui sui CPs (Figura 6-21) mostra un andamento paragonabile a quelli relativi alla distribuzione ottenuta dall'operatore 1, anche se i valori risultano maggiori per tutte e tre le direzioni di circa 0.15-0.2m, con residui di circa 0.35-0.40m in est e Nord e 0.65-0.80m in direzione Up. Così come per i test condotti con OrthoEngine si può quindi affermare che anche piccoli errori di riconoscimento dei punti sulle immagini comportano sensibili incrementi dei residui dell'orientamento: mentre un singolo outlier viene identificato senza alterare nel complesso l'orientamento, piccoli errori su un numero maggiore di punti inficiano invece l'intera elaborazione.

6.3.3. Orientamento con RFM: SISAR

Per la prima distribuzione si ha:

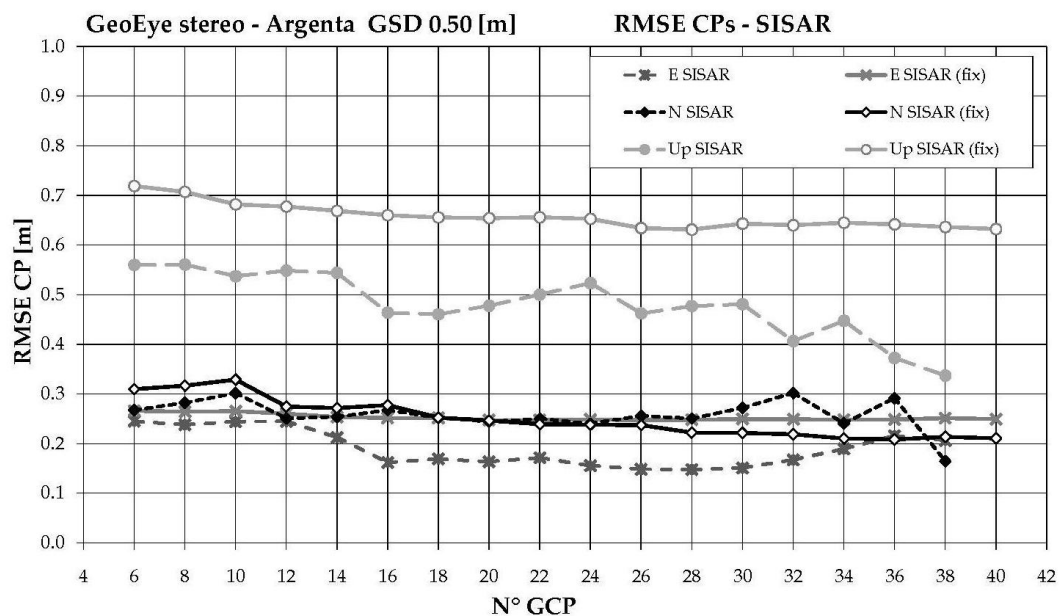


Figura 6-23 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei CPs, SISAR, RFM, distribuzione 1

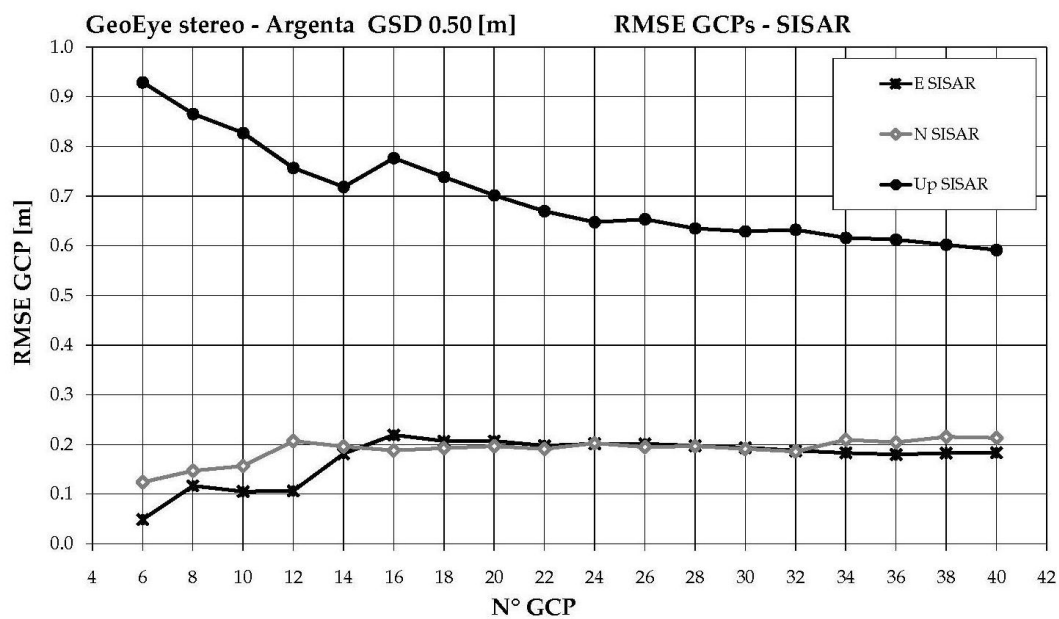


Figura 6-24 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei GCPs, SISAR, RFM, distribuzione 1

Per la seconda distribuzione si ha invece:

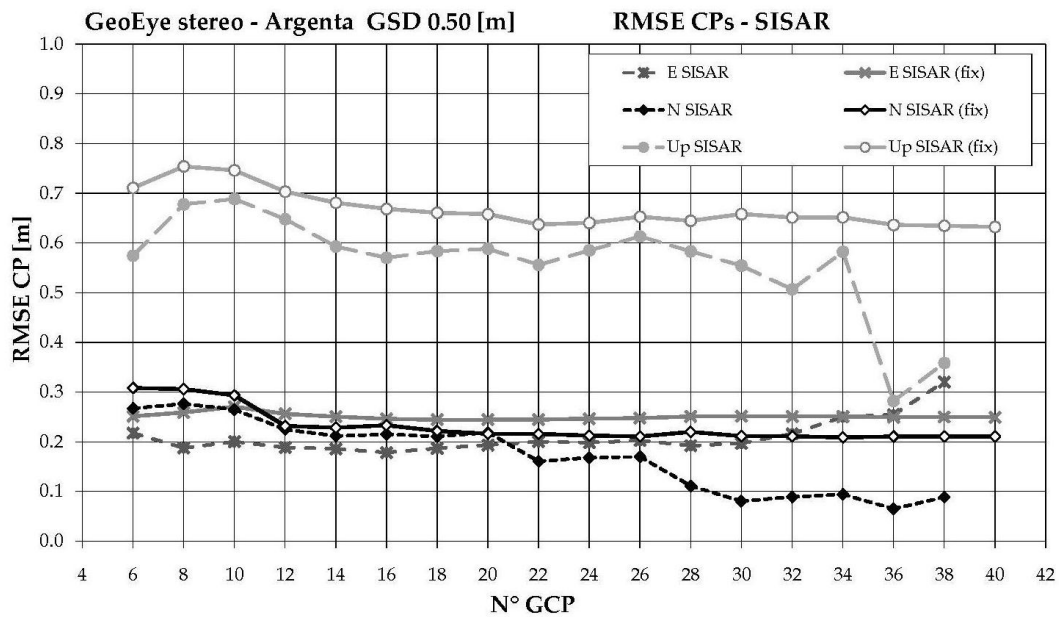


Figura 6-25 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei CPs, SISAR, RFM, distribuzione 2

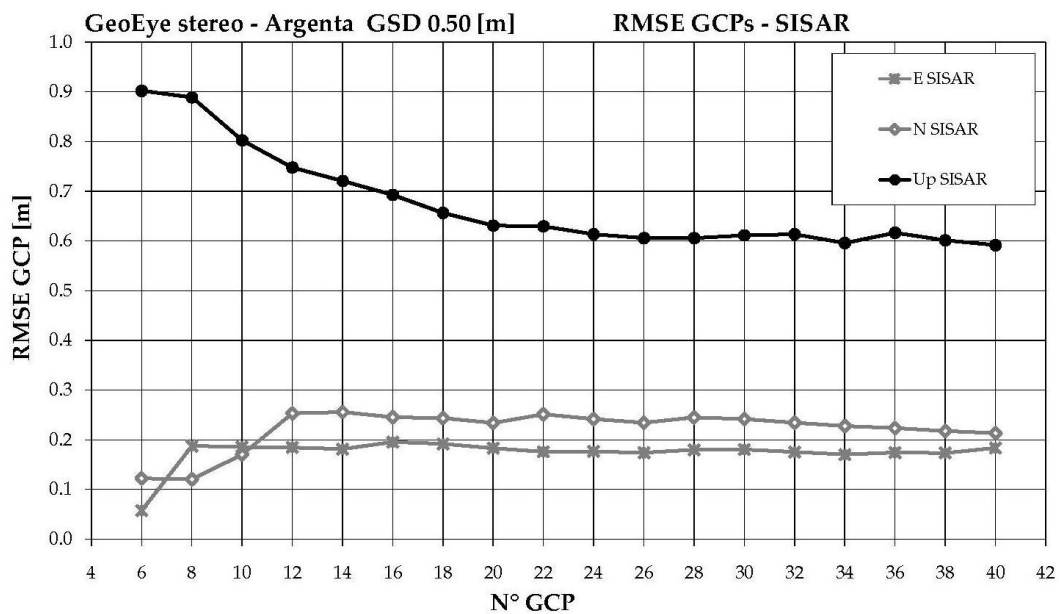


Figura 6-26 - GeoEye-1: grafico dei residui di orientamento dei GCPs, SISAR, RFM, distribuzione 2

Anche in questo caso le due distribuzioni mostrano andamenti paragonabili, con stabilizzazione dell'accuratezza dei CPs a partire da 10 GCPs nel primo caso (Figura 6-23) e 14 nel secondo (Figura 6-25). I residui in Est e Nord sono mediamente dell'ordine di 0.25m (si hanno risultati migliori con il set di CP variabili in numero, nei residui in Est con la prima distribuzione ed in Nord con la seconda), dunque paragonabili con quanto ottenuto con il modello rigoroso. In direzione Up, al contrario, si riscontrano andamenti più variabili, comunque peggiori di quanto ottenuto in precedenza: i residui sui 38 CPs fissi sono paragonabili in ambedue le distribuzioni e dell'ordine di 0.65m; i residui sui punti variabili sono migliori con la prima distribuzione (addirittura meglio anche di quanto ottenuto con il

modello rigoroso) con tendenza a migliorare al crescere dei GCPs (non si assiste in questo caso infatti ad una stabilizzazione dei residui), mentre nel secondo caso l'andamento è molto simile a quello dei 38 punti fissi (con residui migliori di pochi centimetri). In questo caso, per quanto riguarda i GCPs (Figura 6-24 e Figura 6-26) i residui hanno andamenti paragonabile con quello dei CPs, con residui in direzione Est e Nord di circa 0.2-0.25m e in Up di circa 0.6-0.7m, con valori peggiori dati dalla prima distribuzione.

6.3.4. Generazione degli RPC con SISAR

Utilizzando l'elaborazione con 12 GCPs in cui si ottiene la stabilizzazione dei residui con la prima distribuzione di punti, tramite SISAR si è proceduto anche alla generazione di nuovi RPC. Il passo per la generazione della griglia è stato imposto pari a 9m. Con il file di nuovi coefficienti così ottenuto è stato eseguito nuovamente l'orientamento con il modello polinomiale: i risultati, mostrati in Tabella 6-5 (con * è indicato il test eseguito con gli RPC generati con SISAR), evidenziano per i CPs un leggero miglioramento dei residui sui punti in direzione Nord, cui però corrisponde un peggioramento sia in Est che Up (di quasi 0.6m nel caso dei CPs variabili in numero).

RMSE GCPs				RMSE CPs				RMSE CPs (fix)			
n° GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n° GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n° GCP	E[m]	N[m]	Up[m]
12	0.107	0.207	0.757	12	0.245	0.251	0.548	12	0.260	0.275	0.677
12*	0.124	0.190	0.659	12*	0.263	0.253	0.609	12*	0.269	0.270	0.698

Tabella 6-5 - GeoEye-1: Risultati del test per la generazione degli RPC con SISAR (con * è indicato il test eseguito con gli RPC generati con SISAR)

6.3.5. Considerazioni conclusive

I test condotti con il modello rigoroso hanno dato buoni risultati con entrambi i software utilizzati. I residui sui CPs sono compresi nell'intervallo 0.2-0.3m in direzione Est e Nord, mentre tale valore raddoppia in direzione Up (con valori leggermente più elevati per SISAR). Il numero di GCPs con cui si ottiene una sufficiente stabilizzazione dei residui varia tra 10 e 16 con entrambi i software, mentre un comportamento leggermente diverso si ha al variare della distribuzione dei punti stessi: SISAR si mantiene più costante nei valori dei residui, mentre OrthoEngine risulta essere più dipendente dal posizionamento dei punti sull'immagine in particolare per quanto riguarda i residui in direzione Up.

Entrambi i programmi hanno poi mostrato l'importanza di un corretto posizionamento dei punti sulle immagini: test condotti inserendo un outlier fittizio [23] hanno permesso di capire come il modello rigoroso identifichi il punto errato senza inficiare l'orientamento. In questo caso, invece, errori di entità contenuta ($0.5 \div 0.75$ px) ma ripetuti su più punti comportano risultati decisamente scadenti dell'orientamento, con residui in Up addirittura maggiori delle dimensioni del pixel (con conseguenti errori sul successivo calcolo delle coordinate dei punti correlati e dunque del DSM estratto).

Per quanto riguarda il modello polinomiale, testato solamente con SISAR, i residui sono risultati comparabili in planimetria (più elevati in direzione Up rispetto al modello rigoroso) ed anche il numero di GCPs minimo è quasi il medesimo. Così come per IKONOS II (§5.6.3), il tentativo di raffinare gli RPC forniti assieme alle immagini non ha portato miglioramenti, per cui si sconsiglia il ricorso a tali modelli.

Infine, dati i buoni risultati ottenuti, in accordo con quanto descritto per le immagini IKONOS II (Paragrafo 5.8), si è eseguita la medesima procedura anche per orientare le immagini multispettrali in modo da poter condurre prove di generazione del modello anche con esse.

6.4. Orientamento con GCPs e TPs

Per valutare la possibilità di ridurre i tempi ed i costi delle operazioni di rilievo diretto, si è testato il possibile impiego anche di TPs. Per avere un maggior controllo sui risultati ottenuti, dato l'elevato numero di punti a disposizione, i 38 punti di controllo fissi sono stati anche in questo caso usati per valutare la qualità dell'orientamento eseguito, mentre i restanti 40 punti sono stati in questo caso usati come GCPs o TPs. In particolare, impiegando sempre le due distribuzioni introdotte nel paragrafo precedente, sono stati condotti tre tipi di prove:

- test con 5-10-14-20-24-30 GCPs, inserendo i punti rimanenti come TPs;
- test con 5-10-14-20 GCPs, impiegando sempre 10 TPs (derivanti dal test con 30 GCPs);
- test con 5-10-14 GCPs, impiegando sempre 20 TPs (derivanti dal test con 20 GCPs).

Per quanto riguarda le due distribuzioni con 5 punti, non essendo state utilizzate in precedenza, gli ID dei punti sono:

- distribuzione 1: 1-10-24-44-56;
- distribuzione 2: 8-20-25-48-77.

Anche in queste elaborazioni i punti sono stati inseriti con tolleranze sulle coordinate immagine sempre di 0.5 pixel.

6.4.1. Orientamento con modello rigoroso: OrthoEngine v.10.3

I residui su GCPs e CPs ottenuti con la prima distribuzione sono indicati nella tabella sottostante.

RMSE GCPs					RMSE CPs (fix)				
n° GCP	n° TP	E[m]	N[m]	Up[m]	n° GCP	n° TP	E[m]	N[m]	Up[m]
5	35	0.270	0.174	0.000	5	35	0.717	0.413	1.078
5	35*	4603.060	12150.434	247634.289	5	35*	0.717	0.600	450921.519
10	30	10.614	5.632	0.000	10	30	0.247	0.721	102.629
14	26	4.106	2.810	0.000	14	26	0.245	0.632	29.119
20	20	0.221	0.205	0.000	20	20	0.208	0.269	0.628
24	16	0.212	0.203	0.000	24	16	0.204	0.267	0.564
30	10	0.200	0.189	0.000	30	10	0.207	0.255	0.537
5	10	0.272	0.278	0.000	5	10	0.856	2.719	10.926
5	10*	0.794	1.963	35.506	5	10*	0.718	0.594	39.576
10	10	0.191	0.231	0.000	10	10	0.228	0.443	1.926
14	10	0.193	0.202	0.000	14	10	0.231	0.334	0.936
20	10	0.221	0.205	0.000	20	10	0.209	0.269	0.628
5	20	0.270	0.173	0.000	5	20	0.722	0.418	1.099
5	20*	1651.108	4562.627	91909.293	5	20*	0.717	0.607	143776.849
10	20	18.720	9.661	0.000	10	20	0.250	0.607	182.580
14	20	0.192	0.201	0.000	14	20	0.232	0.331	0.910

Tabella 6-6 - GeoEye-1: test con TPs, residui orientamento OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 1

Anche la versione 10.3 necessita di un dato altimetrico di riferimento quando si eseguono test con TPs; in realtà, solo nel caso di 5 GCPs si è riusciti ad eseguire l'orientamento senza tale informazione, ma i valori dei residui (mostrati in Tabella 6-6 con *) evidenziano un chiaro problema durante l'elaborazione.

Impiegando dunque un modello estratto con passo pari a 2 pixel con orientamento eseguito con tutti e 40 i GCPs, per quanto riguarda i CPs, dal confronto con i corrispondenti valori derivanti dai test descritti in precedenza senza l'impiego di TPs (Tabella A.IV-2), si nota che l'impiego di punti omologhi non migliora i residui ottenuti: risultati comparabili con i precedenti sono infatti ottenibili solo a partire da 20 GCPs. A parità di GCPs, inoltre, si vede che in generale il numero di punti omologhi influenza poco i risultati dell'orientamento: l'eccezione è rappresentata dai test con 10 GCPs + 30 TPs e 14 GCPs + 26 TPs, che mostrano residui molto elevati. Dato che questi due test danno risultati anomali anche sui residui dei GCPs, ciò è probabilmente dovuto ad una combinazione di dati in input che instabilizza il programma. Negli altri test, infatti, anche i residui sui GCPs sono comparabili con quelli ottenuti nelle prove senza punti omologhi (purtroppo, anche in questa versione non è possibile avere tra gli output il valore del residuo in direzione Up).

Passando alla differenza tra le coordinate dei TPs rilevate e quelle calcolate dal software si ha:

	5 GCPs – 35 TPs			10 GCPs – 30 TPs			14 GCPs – 26 TPs		
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up
StDev [m]	0.680	0.274	0.994	30.065	15.918	34.467	7.177	5.065	25.843
Media [m]	-0.406	-0.107	0.095	17.808	9.265	-8.985	3.416	2.429	-4.940
RMSE [m]	0.792	0.294	0.999	34.943	18.418	35.619	7.948	5.618	26.311
Min [m]	-1.946	-0.902	-3.847	-29.018	-15.308	-141.300	-7.918	-5.420	-134.124
Max [m]	0.591	0.370	1.586	82.624	43.995	1.153	17.993	12.873	1.153
	20 GCPs – 20 TPs			24 GCPs – 16 TPs			30 GCPs – 10 TPs		
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up
StDev [m]	0.169	0.261	0.606	0.166	0.270	0.610	0.204	0.292	0.583
Media [m]	-0.131	-0.029	0.271	-0.092	-0.025	0.201	-0.109	-0.047	0.340
RMSE [m]	0.214	0.263	0.664	0.189	0.271	0.643	0.231	0.295	0.675
Min [m]	-0.530	-0.788	-1.031	-0.510	-0.793	-1.031	-0.510	-0.780	-0.927
Max [m]	0.199	0.457	1.153	0.255	0.438	1.153	0.256	0.344	1.153

Tabella 6-7 - GeoEye-1: test con TPs variabili, residui sulle coordinate dei TPs, OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 1

10 TPs	5 GCPs			10 GCPs			14 GCPs			20 GCPs		
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up
StDev	0.658	0.699	0.537	0.570	0.487	0.530	0.175	0.359	0.563	0.187	0.305	0.563
Media	-0.830	1.391	0.377	0.163	0.072	0.366	-0.111	-0.002	0.361	-0.127	-0.043	0.361
RMSE	1.059	1.557	0.656	0.593	0.492	0.644	0.207	0.359	0.668	0.226	0.308	0.668
Min	-2.049	0.350	-0.637	-0.827	-0.727	-0.667	-0.453	-0.839	-0.927	-0.529	-0.787	-0.927
Max	-0.010	2.752	1.173	1.115	1.187	1.153	0.240	0.687	1.153	0.199	0.458	1.153
20 TPs	5 GCPs			10 GCPs			14 GCPs					
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up
StDev	0.669	0.297	0.536	55.044	28.451	38.431	0.150	0.341	0.607			
Media	-0.501	-0.136	0.267	31.016	15.869	-1.893	-0.126	0.023	0.275			
RMSE	0.836	0.327	0.599	63.181	32.578	38.477	0.196	0.341	0.666			
Min	-1.931	-0.911	-1.031	-48.049	-24.913	-141.300	-0.450	-0.842	-1.031			
Max	0.570	0.349	0.909	146.658	76.536	98.166	0.235	0.679	1.153			

Tabella 6-8 - GeoEye-1: test con TPs fissi, residui sulle coordinate dei TPs, OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 1 (valori espressi in metri)

I risultati mostrano che l'accuratezza nel calcolo delle coordinate terreno dei TPs da parte del software è praticamente costante in tutti i casi, quindi a parità di GCPs non si hanno vantaggi nell'aumentare il numero di TPs. Per la distribuzione 2 si ha invece:

RMSE GCPs					RMSE CPs (fix)				
n° GCP	n° TP	E[m]	N[m]	Up[m]	n° GCP	n° TP	E[m]	N[m]	Up[m]
5	35	0.521	0.105	0.000	5	35	0.733	0.282	0.666
10	30	0.213	0.190	0.000	10	30	0.277	0.310	0.563
14	26	0.241	0.275	0.000	14	26	0.243	0.348	0.613
20	20	0.223	0.222	0.000	20	20	0.203	0.292	0.654
24	16	0.212	0.252	0.000	24	16	0.205	0.273	0.627
30	10	0.206	0.245	0.000	30	10	0.203	0.255	0.593
5	10	0.517	0.100	0.000	5	10	0.735	0.293	0.686
5	10*	633.050	4754.009	41296.278	5	10*	0.755	0.649	38889.196
10	10	0.206	0.186	0.000	10	10	0.280	0.310	0.546
14	10	0.238	0.272	0.000	14	10	0.246	0.348	0.603

20	10	0.222	0.221	0.000	20	10	0.204	0.292	0.645
5	20	0.519	0.102	0.000	5	20	0.734	0.288	0.674
5	20*	7689.509	57936.007	504716.202	5	20*	0.755	0.651	6431301.085
10	20	1.652	0.836	0.000	10	20	0.418	1.491	136.073
14	20	0.241	0.274	0.000	14	20	0.244	0.348	0.613

Tabella 6-9 - GeoEye-1: test con TPs, residui orientamento OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 2

	5 GCPs – 35 TPs			10 GCPs – 30 TPs			14 GCPs – 26 TPs		
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up
StDev [m]	0.750	0.226	1.066	0.269	0.290	0.965	0.262	0.392	0.641
Media [m]	0.145	-0.037	0.014	0.000	-0.063	0.161	-0.057	0.045	0.259
RMSE [m]	0.764	0.229	1.066	0.269	0.297	0.978	0.268	0.395	0.691
Min [m]	-1.386	-0.667	-3.847	-0.622	-0.624	-3.797	-0.590	-0.588	-1.031
Max [m]	1.834	0.432	1.746	0.416	0.550	1.206	0.383	0.838	1.202
	20 GCPs – 20 TPs			24 GCPs – 16 TPs			30 GCPs – 10 TPs		
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up
StDev [m]	0.222	0.375	0.646	0.217	0.298	0.539	0.195	0.276	0.415
Media [m]	-0.134	0.017	0.247	-0.136	0.001	0.423	-0.135	-0.037	0.463
RMSE [m]	0.260	0.376	0.692	0.256	0.298	0.685	0.237	0.278	0.622
Min [m]	-0.606	-0.545	-1.031	-0.564	-0.484	-0.737	-0.452	-0.477	-0.264
Max [m]	0.188	0.639	1.202	0.191	0.551	1.202	0.220	0.506	1.190

Tabella 6-10 - GeoEye-1: test con TPs variabili, residui sulle coordinate dei TPs, OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 2

10 TPs	5 GCPs			10 GCPs			14 GCPs			20 GCPs		
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up
StDev	0.672	0.104	0.360	0.252	0.240	0.456	0.288	0.424	0.489	0.240	0.355	0.421
Media	0.137	-0.051	0.452	-0.038	-0.033	0.459	-0.100	0.034	0.486	-0.156	0.003	0.448
RMSE	0.686	0.116	0.578	0.255	0.242	0.647	0.305	0.425	0.689	0.286	0.355	0.615
Min	-1.386	-0.212	-0.264	-0.501	-0.369	-0.321	-0.518	-0.571	-0.321	-0.527	-0.526	-0.264
Max	1.023	0.182	0.978	0.366	0.527	1.046	0.290	0.831	1.190	0.191	0.636	1.190
20 TPs	5 GCPs			10 GCPs			14 GCPs					
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up			
StDev	0.688	0.174	0.614	16.603	7.374	31.034	0.262	0.438	0.675			
Media	0.093	-0.020	0.271	39.423	-17.482	-6.733	-0.101	0.037	0.266			
RMSE	0.694	0.176	0.671	42.776	18.974	31.756	0.281	0.439	0.726			
Min	-1.385	-0.236	-1.121	8.027	-29.916	-141.950	-0.590	-0.588	-1.031			
Max	1.417	0.432	1.232	66.799	-3.481	1.958	0.288	0.839	1.202			

Tabella 6-11 - GeoEye-1: test con TPs fissi, residui sulle coordinate dei TPs, OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 2 (valori espressi in metri)

In generale i risultati sono in accordo con quelli della prima distribuzione, in più in questo caso il programma non ha mostrato alcuna instabilità con nessuna combinazione di GCPs + TPs, evidenziando dunque ancora come la distribuzione dei punti impiegati sia di fondamentale importanza. Nel complesso si può comunque concludere che l'impiego di TPs non apporta vantaggi durante la fase di orientamento.

6.4.2. Orientamento con modello rigoroso: SISAR

I residui su GCPs e CPs ottenuti con la prima distribuzione sono indicati nella tabella sottostante.

RMSE GCPs					RMSE CPs (fix)				
n°GCP	num TP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	num TP	E[m]	N[m]	Up[m]
5	35	0.003	0.000	0.001	5	35	0.396	0.609	0.988
10	30	0.005	0.003	0.002	10	30	0.261	0.382	0.729
14	26	0.005	0.004	0.002	14	26	0.264	0.275	0.649
20	20	0.004	0.004	0.002	20	20	0.262	0.246	0.638
24	16	0.004	0.004	0.002	24	16	0.263	0.240	0.629
30	10	0.004	0.004	0.002	30	10	0.263	0.220	0.629
5	10	0.003	0.000	0.001	5	10	0.440	0.662	0.943
10	10	0.005	0.003	0.002	10	10	0.261	0.381	0.718
14	10	0.005	0.004	0.002	14	10	0.263	0.275	0.646
20	10	0.004	0.004	0.002	20	10	0.263	0.247	0.637
5	20	0.003	0.000	0.001	5	20	0.418	0.635	0.956
10	20	0.005	0.003	0.002	10	20	0.261	0.381	0.719
14	20	0.005	0.004	0.002	14	20	0.263	0.275	0.647

Tabella 6-12 - GeoEye-1: test con TP_s, residui orientamento SISAR, modello rigoroso, distribuzione 1

Dall'analisi dei residui, si vede che, a parità di GCPs il numero di TP_s impiegato non varia i valori ottenuti. In aggiunta, un confronto con i residui sui CP_s ottenuti dai test di orientamento con soli GCPs (Tabella A.IV-6) mostra un peggioramento dei valori in tutti i test condotti.

Per quanto riguarda le coordinate calcolate dal software, i residui ottenuti come differenza con quelle calcolate durante il rilievo diretto (Tabella 6-13 e Tabella 6-14) mostrano per i test con 5 GCPs sempre residui molto elevati, mentre a partire da quelli con 10 GCPs si assiste ad una stabilizzazione dei valori (in accordo con quanto ottenuto dai test con soli GCPs), anche con soli 10 TP_s: aumentare dunque eccessivamente il numero di punti omologhi non porta a miglioramenti dell'orientamento a parità di GCPs usati. I valori di RMSE sono però elevati soprattutto in direzione Up, come mostrano anche i picchi di errore massimo e minimo riportati nelle tabelle sottostanti.

	5 GCPs – 35 TP _s			10 GCPs – 30 TP _s			14 GCPs – 26 TP _s		
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up
StDev [m]	0.351	0.629	1.530	0.220	0.238	0.695	0.189	0.249	0.590
Media [m]	0.233	-0.020	-0.427	-0.081	-0.236	-0.137	-0.098	-0.090	-0.047
RMSE [m]	0.421	0.630	1.589	0.234	0.335	0.709	0.213	0.264	0.591
Min [m]	-0.481	-1.674	-2.900	-0.620	-0.852	-1.289	-0.525	-0.929	-1.192
Max [m]	1.013	1.335	3.558	0.344	0.276	1.933	0.289	0.289	1.697
	20 GCPs – 20 TP _s			24 GCPs – 16 TP _s			30 GCPs – 10 TP _s		
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up
StDev [m]	0.165	0.248	0.467	0.179	0.251	0.504	0.194	0.298	0.454
Media [m]	-0.045	-0.072	-0.199	-0.012	-0.073	-0.183	0.011	-0.075	-0.189
RMSE [m]	0.171	0.258	0.507	0.180	0.262	0.537	0.195	0.307	0.492
Min [m]	-0.313	-0.864	-1.240	-0.310	-0.857	-1.221	-0.301	-0.835	-0.915
Max [m]	0.340	0.347	0.720	0.381	0.359	0.799	0.378	0.381	0.818

Tabella 6-13 - GeoEye-1: test con TP_s variabili, residui sulle coordinate dei TP_s, SISAR, modello rigoroso, distribuzione 1

10 TPs	5 GCPs			10 GCPs			14 GCPs			20 GCPs		
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up
Dev.St	0.356	0.695	1.507	0.179	0.306	0.541	0.175	0.315	0.480	0.187	0.304	0.458
Media	0.247	-0.150	-0.739	-0.043	-0.225	-0.257	-0.050	-0.118	-0.183	-0.012	-0.094	-0.242
RMSE	0.433	0.711	1.678	0.184	0.380	0.599	0.182	0.336	0.513	0.187	0.318	0.518
Min	-0.339	-1.674	-2.900	-0.250	-0.852	-1.282	-0.273	-0.929	-1.082	-0.313	-0.864	-1.003
Max	1.013	0.721	1.491	0.286	0.276	0.483	0.271	0.289	0.580	0.340	0.347	0.720
20 TPs	5 GCPs			10 GCPs			14 GCPs					
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up			
Dev.St	0.349	0.632	1.457	0.185	0.257	0.639	0.171	0.261	0.534			
Media	0.233	-0.038	-0.418	-0.083	-0.226	-0.203	-0.088	-0.094	-0.120			
RMSE	0.420	0.633	1.516	0.203	0.342	0.671	0.193	0.277	0.547			
Min	-0.481	-1.674	-2.900	-0.434	-0.852	-1.289	-0.352	-0.929	-1.192			
Max	1.013	1.020	2.187	0.286	0.276	1.004	0.271	0.289	0.741			

Tabella 6-14 - GeoEye-1: test con TPs fissi, residui sulle coordinate dei TPs, SISAR, modello rigoroso, distribuzione 1 (valori espressi in metri)

Passando alla seconda distribuzione si ha:

RMSE GCPs					RMSE CPs (fix)				
n° GCP	num TP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	num TP	E[m]	N[m]	Up[m]
5	35	0.001	0.000	0.001	5	35	1.195	2.382	3.689
10	30	0.005	0.004	0.002	10	30	0.296	0.287	0.723
14	26	0.005	0.005	0.002	14	26	0.288	0.226	0.633
20	20	0.005	0.005	0.002	20	20	0.284	0.215	0.607
24	16	0.004	0.005	0.002	24	16	0.270	0.208	0.610
30	10	0.004	0.005	0.002	30	10	0.267	0.204	0.642
5	10	0.002	0.000	0.001	5	10	1.249	2.317	3.947
10	10	0.005	0.004	0.002	10	10	0.297	0.290	0.718
14	10	0.005	0.005	0.002	14	10	0.288	0.227	0.628
20	10	0.005	0.005	0.002	20	10	0.285	0.215	0.608
5	20	0.001	0.000	0.001	5	20	1.245	2.358	3.914
10	20	0.005	0.004	0.002	10	20	0.295	0.288	0.717
14	20	0.005	0.005	0.002	14	20	0.287	0.225	0.628

Tabella 6-15 - GeoEye-1: test con TPs, residui orientamento SISAR, modello rigoroso, distribuzione 2

	5 GCPs – 35 TPs			10 GCPs – 30 TPs			14 GCPs – 26 TPs		
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up
StDev [m]	2.478	1.656	8.703	0.249	0.240	0.609	0.255	0.217	0.529
Media [m]	-0.202	0.121	0.666	0.130	-0.114	-0.534	0.027	-0.052	-0.354
RMSE [m]	2.486	1.661	8.729	0.281	0.266	0.810	0.256	0.223	0.636
Min [m]	-6.757	-3.525	-17.312	-0.312	-0.823	-1.855	-0.409	-0.308	-1.482
Max [m]	5.408	5.140	24.776	0.660	0.349	0.860	0.566	0.638	0.860
	20 GCPs – 20 TPs			24 GCPs – 16 TPs			30 GCPs – 10 TPs		
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up
StDev [m]	0.227	0.222	0.597	0.217	0.169	0.472	0.216	0.089	0.488
Media [m]	-0.068	0.040	-0.262	-0.026	0.022	-0.296	-0.011	-0.003	-0.252
RMSE [m]	0.237	0.225	0.652	0.218	0.170	0.557	0.216	0.089	0.549
Min [m]	-0.389	-0.205	-1.343	-0.348	-0.217	-1.191	-0.334	-0.115	-1.181
Max [m]	0.383	0.669	0.941	0.378	0.563	0.550	0.387	0.174	0.603

Tabella 6-16 - GeoEye-1: test con TPs variabili, residui sulle coordinate dei TPs, SISAR, modello rigoroso, distribuzione 2

10 TPs	5 GCPs			10 GCPs			14 GCPs			20 GCPs		
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up
Dev.St	0.993	0.644	3.800	0.239	0.121	0.651	0.246	0.103	0.548	0.230	0.093	0.552
Media	-0.046	0.013	-0.048	0.120	-0.063	-0.584	0.015	-0.044	-0.410	-0.053	0.020	-0.283
RMSE	0.994	0.645	3.800	0.267	0.137	0.875	0.247	0.112	0.684	0.236	0.095	0.621
Min	-1.500	-1.303	-8.166	-0.155	-0.255	-1.855	-0.292	-0.202	-1.482	-0.382	-0.122	-1.343
Max	1.896	0.930	4.508	0.610	0.125	0.465	0.510	0.106	0.488	0.383	0.172	0.618

20 TPs	5 GCPs			10 GCPs			14 GCPs		
	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up	Est	Nord	Up
Dev.St	1.974	1.238	7.267	0.228	0.191	0.676	0.237	0.226	0.583
Media	-0.137	0.089	0.274	0.074	-0.064	-0.543	-0.016	-0.015	-0.366
RMSE	1.979	1.241	7.272	0.240	0.201	0.867	0.237	0.226	0.689
Min	-4.717	-2.045	-13.517	-0.312	-0.453	-1.855	-0.409	-0.234	-1.482
Max	3.494	3.164	17.501	0.610	0.349	0.860	0.510	0.638	0.860

Tabella 6-17 - GeoEye-1: test con TPs fissi, residui sulle coordinate dei TPs, SISAR, modello rigoroso, distribuzione 2
(valori espressi in metri)

Anche in questo caso i risultati tra le due distribuzioni sono in perfetto accordo, mostrando un sostanziale peggioramento con l'impiego di TPs.

6.5. Estrazione dei DSMs

Terminate le analisi sugli orientamenti, si è passati alla fase di estrazione dei modelli veri e propri, sia utilizzando OrthoEngine, per l'intera immagine, che SISAR, concentrandosi in questo caso su alcune porzioni con copertura omogenea. In questo paragrafo verranno descritti solamente i modelli estratti e le scelte adottate, mentre si rimanda al successivo per i risultati delle validazioni.

6.5.1. DSMs estratti con OrthoEngine v.10.3

Visti i risultati incoraggianti ottenuti con le immagini IKONOS II, sono state eseguite prove sia sulla stereocoppia pancromatica che su quella NIR. Generate le immagini epipolari, è stato avviato il processo automatico di generazione del modello, impostando i seguenti valori sulla base dell'esperienza maturata con le immagini IKONOS II (§5.9.2):

- Minimum elevation: -30m per modelli realizzati con orientamento eseguito con il modello rigoroso, 10 per quelli con RFM;
- Maximum elevation: 60m per modelli realizzati con orientamento eseguito con il modello rigoroso, 110 per quelli con RFM;
- Failure value: -100;
- Background value: -150;
- DEM detail: high;
- Output DEM channel type: 32 bit real;

- Pixel sampling interval: per le immagini pancromatiche: 1 (per valutare le potenzialità delle immagini), 2 (come valore standard), 4 (per un confronto con i modelli estratti dalla banda NIR); per le immagini NIR: 1;
- Fill holes and filter: no;
- Create score channel: no (dato che con le immagini Ikonos non si è riusciti a sfruttare le informazioni in esso contenute);
- Create geocoded DEM: sì;
- Output option: use last value.

Mantenute dunque fisse tali impostazioni, sono stati estratti i seguenti modelli utilizzando il metodo rigoroso per la fase di orientamento:

Banda	Coppia epipolare	n° GCPs (distribuzione)	Risoluzione [px]
NIR	0-1	40	1
	1-0		
PAN	1-0	40	1
		16 (1)	2
		16 (2)	
		40	
	40	4	
	0-1	40	4

Tabella 6-18 - Geoeye-1: riassunto dei DSM estratti con OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso

Analogamente, con il modello RPC si sono estratti:

banda	coppia epipolare	n° GCPs (distribuzione)	ordine polinomio	risoluzione [px]
PAN	1-0	16 (1)	0	2
		16 (2)		
		40		
		40	1	1
		16 (1)		2
		16 (2)		
		40		
		40		4
		40		2
		16 (1)	2	
		16 (2)		
		40		

Tabella 6-19 - Geoeye-1: riassunto dei DSM estratti con OrthoEngine v.10.3, RFM

Per quanto riguarda i tempi di elaborazione e le dimensioni del file finale, migliorando il GSD delle immagini ovviamente il parametro fondamentale è sempre di più la risoluzione del pixel nel modello estratto. Impiegando ancora la workstation con processore Intel Xeon Quad-core da 2.66 GHz, 8 GB DDR2 di memoria RAM e sistema operativo Windows XP 64 bit i valori sono risultati essere pari a:

Generazione immagini epipolari			
Stereocoppia	Dimensione file .TIF	Dimensione progetto	Tempi di elaborazione
Pan	2 x 1.2 GB	\	~20 min
NIR	2 x 73.5 MB	\	~3 min
Generazione DSM			
Risoluzione [px]	Dimensione file .TIF	Dimensione progetto	Tempi di elaborazione
Pan	1	1.55 GB	8.25 GB
	2	386 MB	3.8 GB
	4	96.5 MB	2.7 GB
NIR	1	96.5 MB	650 MB
			~0.75 ore

Tabella 6-20 - Geoeye-1: riassunto di tempi di elaborazione e dimensioni progetti creati con OrthoEngine v.10.3

Il primo controllo sul modello estratto si ha sempre analizzando il report dell'elaborazione e quindi la percentuale di correlazione positiva dei punti immagine ed il controllo sulle quote dei punti usati durante l'orientamento, col calcolo delle differenze tra la quota nota del singolo punto (GCP o CP) e quella ottenuta nel modello. I risultati sono riportati in Tabella 6-21 e Tabella 6-22.

DEM	NIR 1-0	NIR 0-1	PAN 1px	PAN 2px	PAN 2px	PAN 2px	PAN 4px	PAN_0-1 4px
n° GCPs	40	40	40	40	16 (1)	16 (2)	40	40
DEM corr succ %	0.8412	0.8468	0.4150	0.4150	0.4153	0.4171	0.4148	0.4138
GCPs	Mean [m]	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
	RMSE [m]	1.3	1.2	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0
	Max [m]	4.1	3.8	2.2	2.6	1.8	2.3	3.4
CPs fix	Mean [m]	0.3	0.2	-0.1	0.1	-0.1	0.0	-0.1
	RMSE [m]	1.6	1.7	0.9	0.9	1.2	1.2	0.9
	Max [m]	4.0	5.9	2.8	1.7	4.1	5.1	2.3
CPs	Mean [m]	\	\	\	\	-0.5	-0.3	\
	RMSE [m]	\	\	\	\	0.9	0.8	\
	Max [m]	\	\	\	\	2.3	1.6	\

Tabella 6-21 - Geoeye-1: riassunto dei report della fase di estrazione dei DSM con OrthoEngine, modello rigoroso

DEM	ordine 0			ordine 1				ordine 2			
	2px	2px	2px	1px	2px	2px	2px	4px	2px	2px	2px
n° GCPs	40	16 (1)	16 (2)	40	40	16 (1)	16 (2)	40	40	16 (1)	16 (2)
DEM corr succ %	0.4204	0.4243	0.4226	0.4210	0.4210	0.4222	0.4224	0.4207	0.4157	0.4156	0.4155
GCPs	Mean [m]	0.1	0.3	0.0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.0	-0.1	0.1
	RMSE [m]	0.6	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8
	Max [m]	1.6	1.1	2.0	1.7	1.8	1.4	1.3	2.9	1.6	1.5
CPs fix	Mean [m]	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.3	0.0	-0.1	-0.1
	RMSE [m]	0.9	0.8	0.9	0.9	1.2	0.8	0.8	0.8	1.0	1.3
	Max [m]	3.1	2.5	2.6	3.1	3.9	2.0	2.1	1.8	2.8	4.6
CPs	Mean [m]	\	0.1	0.2	\	\	0.1	0.2	\	\	-0.1
	RMSE [m]	\	0.5	0.4	\	\	0.4	0.6	\	\	0.6
	Max [m]	\	1.0	0.9	\	\	1.0	1.1	\	\	0.8

Tabella 6-22 - Geoeye-1: riassunto dei report della fase di estrazione dei DSM con OrthoEngine, RFM

Dal confronto tra quote note e quote ricavate durante il matching sembrerebbe esserci una buona corrispondenza per tutti i punti: con il modello rigoroso i RMSEs si mantengono pressoché costanti in tutte le elaborazioni, mentre all'aumentare della dimensione del pixel di output si vede che l'errore massimo tende a crescere (come è logico aspettarsi dato che il valore del singolo pixel deriva dalla

media di un numero via via maggiore di punti). Inoltre, anche i modelli estratti dalle immagini della banda NIR si mostrano in linea con i corrispondenti modelli a 4 pixel di risoluzione estratti dalle immagini pancromatiche. Risultati del tutto analoghi si sono ottenuti a partire dall'orientamento col modello RPC, in cui non si hanno differenze tra i vari ordini del polinomio. Il parametro più significativo è però rappresentato per entrambi i modelli dalla percentuale di correlazione: per le immagini NIR si ha un valore dell'84%, mentre per le immagini pancromatiche tale valore è solo del 41%. Ciò è dovuto al carattere fortemente rurale dell'area analizzata: osservando i modelli (Figura 6-27), si nota che sono stati riconosciuti solamente i centri abitati e le strade, sia quelle asfaltate che le capezzagne nelle aree coltivate; praticamente tutti i campi (a fine marzo quasi tutti solamente arati o coperti da manto erboso) sono risultati troppo omogenei per permettere al software di ottenere un alto coefficiente di correlazione risolvendo i problemi di texture e pattern. Come mostrato sempre in Tabella 6-20 l'ulteriore prova, condotta sia per la stereocoppia Pancromatiche che per la NIR, invertendo l'ordine delle immagini epipolari non ha assolutamente apportato nessuna variazione.

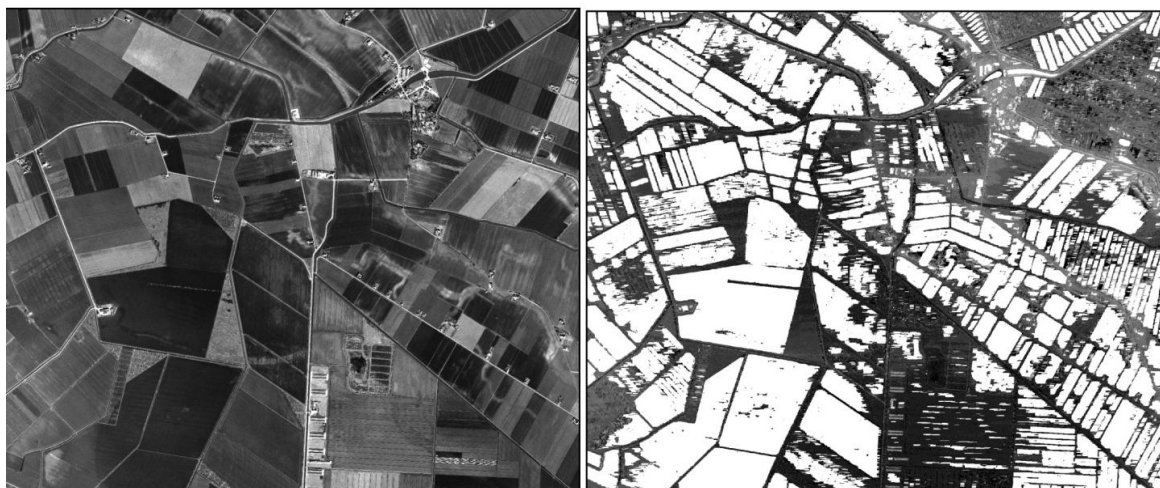


Figura 6-27 - GeoEye-1: immagine pancromatica (sinistra) e area corrispondente del DSM estratto con OrthoEngine v.10.3 (destra): praticamente per tutti i campi non è stato estratto il valore di quota (pixel bianchi)

Per poter dunque ottenere un modello completo ed utilizzabile è necessario colmare tali aree prive di informazione: data l'elevata percentuale da elaborare un editing manuale sarebbe troppo oneroso in termini di risorse umane, e, come mostrato dai test sulle immagini IKONOS II (§5.9.2), anche i tools implementati nel software non consentono di ottenere buoni risultati in maniera semiautomatica.

Si sono dunque provate due procedure automatiche:

- il riempimento automatico presente in OrthoEngine nello step di geocodifica del DSM: ripetendo solo lo step di geocodifica è possibile applicare un filtro di riempimento differente rispetto a quello della fase di estrazione, che ha mostrato risultati migliori in quanto non comporta lo smoothing dell'intero modello.
- il toolbox Spatial Analyst Tools | Hydrology | Fill, presente in ArcMap 9.3, specifico per la correzione di aree con brusche variazioni di quota (positive o negative) nelle immagini raster.

Con i due software tale operazione è molto rapida, richiedendo al più circa 20-30 min per i modelli estratti a risoluzione di un pixel.

In entrambi i casi, però, dall'analisi dei DSM è risultato che anche i valori di quota nelle aree precedentemente estratte venivano modificati:

- in OrthoEngine ci si aspettava che il filtro agisse esclusivamente nelle aree prive di dato: nella finestra di settaggio è infatti necessario specificare nuovamente qual è il Failure Value nel DEM su cui si sta per effettuare l'editing.
- nel toolbox di ArcMap ciò è invece comprensibile per come è impostato il comando, che procede mediando tutti i picchi o i buchi analizzando il contorno di ogni pixel. Anche i singoli edifici o alberi rappresentano in questo caso delle anomalie che il software cerca di correggere. In effetti sarebbe possibile impostare un valore limite oltre cui il filtro non interviene, ma nel nostro caso ciò non è stato possibile in quanto è proprio la differenza massima, ovvero quella con i pixel a valore -100 (impostato come Failure Value) che si vuole modificare.

Per rimediare a tale inconveniente si è dunque implementata in ArcMap una procedura composta dai seguenti passaggi:

- creazione dal modello originale estratto da OrthoEngine di una maschera contenente le zone prive di informazioni altimetriche (lacune);
- estrazione dell'informazione di quota dal modello cui si è applicato il filtro di riempimento, solo per le aree contenute nella maschera delle lacune appena creata;
- inserimento dei valori di quota estratti al passo precedente nel modello originale.

In questo caso i tempi di elaborazione sono molto dipendenti dalla risoluzione del pixel del DSM generato, in quanto per i modelli estratti a 4 pixel sono sufficienti circa 20 minuti, mentre per quelli estratti ad un pixel si necessita di circa 1.5 ore. Purtroppo però è stato possibile applicare tale procedura solo ai modelli cui si è applicato il filtro di riempimento direttamente in Arcmap; si è infatti riscontrato che l'estensione e la coordinata del pixel in alto a sinistra dei modelli editati con OrthoEngine variavano rispetto a quelle ottenute durante la fase di generazione automatica del modello: ritagliare il modello editato non comportava problemi, mentre lo shift di frazioni del metro per sovrapporre i pixel avrebbe comportato un ulteriore ricampionamento dei pixel values.

Un ulteriore problema deriva da errori di correlazione nella fase di matching (e dal conseguente errore nella valutazione della quota), oltre che dalla presenza di oggetti isolati a quota sensibilmente diversa rispetto a quella dei campi (alberi, edifici, tralicci della linea ad alta tensione, ...): ciò ha infatti creato numerose irregolarità nelle zone editate, con variazioni in quota di alcuni metri certamente non presenti nella realtà (Figura 6-28). Nel complesso, però, il filtro impiegato in ArcMap riduce tale inconveniente, in quanto applica un valor medio all'intera lacuna: lo svantaggio in tale caso è rappresentato dal fatto che non si sa quale sia il filtro applicato e non si può modificare la dimensione della finestra di ricerca utilizzata.

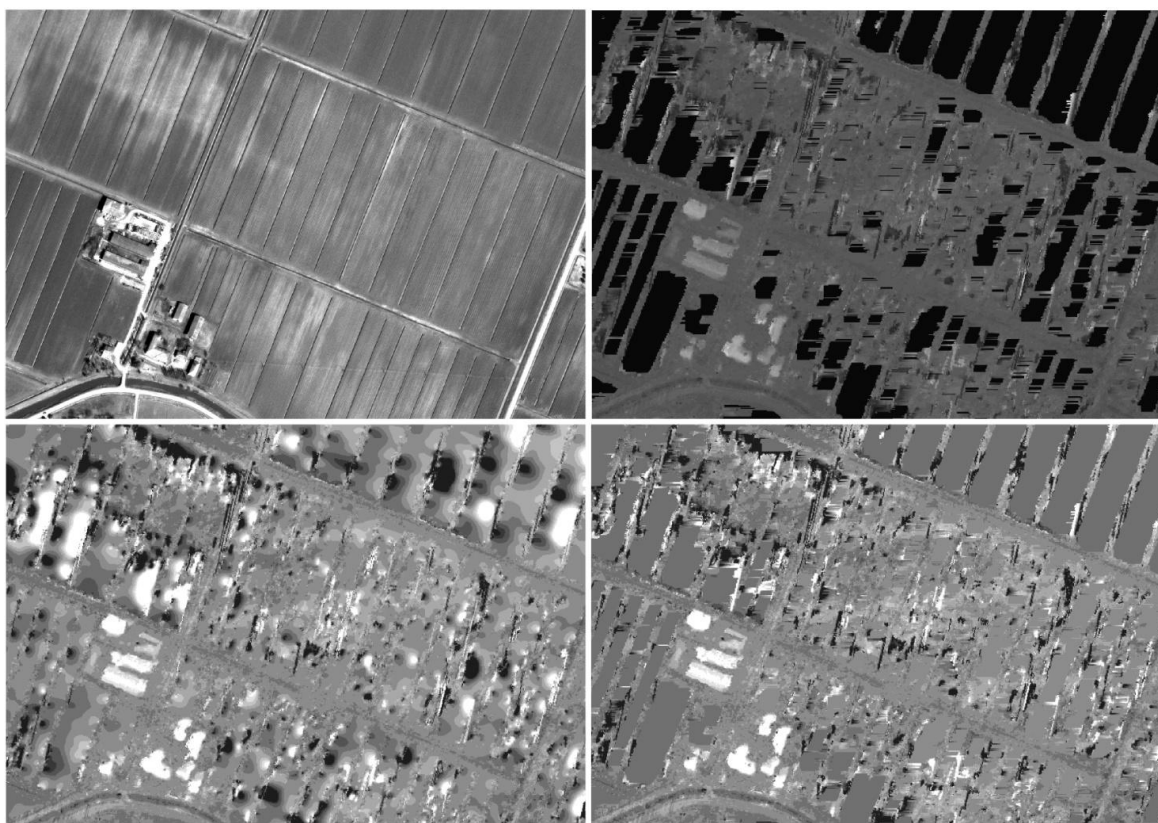


Figura 6-28 - GeoEye-1: immagine pancromatica (sinistra, in alto), modello estratto con OrthoEngine (destra, in alto), fill con OrthoEngine (sinistra, in basso), fill con ArcMap (destra, in basso): si notano le differenze dei due filtri e le irregolarità nei valori di quota anche in aree omogenee

Per rimediare dunque agli inconvenienti incontrati con le procedure automatiche e per cercare di controllare i parametri inseriti nella fase di editing, sempre in ambiente GIS è stata sviluppata una procedura che esegue un buffer di 1px di ogni area priva di informazioni, per poi colmare i No data con il valor medio di tutti i pixel presenti nell'area così estratta. Più nel dettaglio, gli step necessari per eseguire il riempimento delle lacune sono i seguenti:

- conversione della quota in centimetri e trasformazione del modello a 16bit;
- eliminazione dei valori di background;
- estrazione della maschera con le aree senza informazione di quota (celle con il Failure Value);
- conversione della maschera da raster a shapefile poligonale;
- buffer di ciascuna lacuna (ovvero di ogni poligono) di 1px ed inserimento di un campo identificativo per ogni poligono così creato;
- estrazione dal modello di input dei valori di quota presenti nell'area di buffer;
- calcolo per ogni poligono dei parametri statistici, in particolare della media;
- creazione di una relazione tra singolo poligono e rispettiva quota media calcolata;
- buffer di 2m di ciascun poligono e conversione dello shapefile in raster utilizzando la quota come parametro per l'attribuzione del valore alla cella;
- sostituzione dei valori così ottenuti nelle lacune presenti nel modello di input;

- riconversione a 32bit e trasformazione della quota in metri.

Tutti i singoli passaggi sono stati uniti mediante la creazione di un toolbox personalizzato, in maniera da inserire in uno step unico tutti i parametri di input e poi avviare l'elaborazione, la cui durata come solito dipende dalla risoluzione del modello in esame: circa 0.5, 1.5 e 5 ore per modelli estratti rispettivamente a 4, 2 ed 1 pixel. A causa dell'instabilità del toolbox editor, non ancora ottimizzato all'interno del software, spesso l'elaborazione si bloccava (solitamente in step differenti) e necessitava un ripristino. In aggiunta, per le immagini estratte a risoluzione di 1 e 2 pixel è stato necessario suddividere lo shapefile poligonale per evitare di bloccare il processo durante il calcolo dei parametri statistici a causa dell'elevato numero di elementi contenuti (il numero di poligoni al variare della risoluzione del modello è riportato in Tabella 6-23). Proprio il calcolo di tali valori si è mostrata l'operazione più onerosa a causa della necessità di analizzare ed elaborare i dati per ogni entità singolarmente e dell'impossibilità di scegliere quali parametri calcolare (sono infatti computati media, mediana, minimo, massimo, delta, valore più/meno frequente, deviazione standard, somma, varietà).

Risoluzione [px]	1	2	4	1 (NIR)
Poligoni	38000	18500	10000	2900

Tabella 6-23 - Numero di poligoni privi di informazione in quota al variare della risoluzione in pixel del modello estratto con OrthoEngine



Figura 6-29 - GeoEye-1: fill con ArcMap: tool automatico (sinistra) e procedura manuale (destra): si nota un andamento analogo delle due tecniche, con valori più dipendenti da errori nel matching di OrthoEngine per quanto riguarda la procedura manuale

Un confronto con il fill automatico (Figura 6-29) mostra un andamento in generale comparabile tra le due procedure: il filtro automatico media con finestre più grandi, risultando meno sensibile ad errori nel matching eseguito da OrthoEngine, problema che invece si riscontra con la procedura implementata, soprattutto nel caso di lacune di dimensioni medio-piccole. L'approssimazione derivante dall'impiego della media come valore di riempimento è stata comunque ritenuta accettabile dato che l'area in esame è completamente pianeggiante e che le variazioni di quota tra i singoli campi e le strade che li attraversano sono inferiori al metro.

Tutti i modelli così creati ed editati sono stati poi validati al fine di valutare la precisione ottenibile.

6.5.2. DSMs estratti con SISAR

A differenza di quanto fatto con le immagini IKONOS II, in questo caso sono state eseguite prove di estrazione solo con le immagini pancromatiche. Si sono dunque estratti tre tiles di 3000x3000 pixel in area urbana (centro di Argenta), di campagna (priva di zone a frutteto e con vegetazione alta, con presenza di pochi ed isolati edifici) e mista (zona artigianale a Nord-Ovest di Argenta, con frutteti in un piccolo boschetto nelle immediate vicinanze) (Figura 6-30).



Figura 6-30 - GeoEye-1: tiles estratti per le prove di estrazione dei DSMs con SISAR

Editato dunque l'istogramma delle frequenze in ciascuno dei tile e salvate le immagini ad 8bit, il matching è stato eseguito con una versione modificata dell'algoritmo rispetto a quella impiegata per le immagini IKONOS II, variando in questo caso i seguenti parametri:

- row/col step: 2-3 pixel, rappresenta il passo per il movimento della finestra di ricerca.
- dimensione della finestra: 9-11 pixel, va stabilita sia per il matching che per l'ottimizzazione con i minimi quadrati (i due valori sono solitamente uguali o quella per i minimi quadrati è più grande).
- soglia per il taglio della correlazione: 0.70-0.85.
- layers: 14-16, è il numero di livelli in cui viene calcolata la trasformazione affine per eseguire il matching.
- valori quote: -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, sono le quote (in metri sul livello del mare) a cui è stata calcolata la trasformazione affine. Per una delle elaborazioni sul tile di campagna si sono invece usati i valori: -6, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 14, 18, 22m.
- movimento punto: ± 1 pixel, è il valore di cui ciascun punto può essere spostato in ognuna delle due immagini della stereocoppia durante la fase di ottimizzazione ai minimi quadrati.

Il riassunto delle impostazioni ed il numero di punti omologhi ottenuti è il seguente:

Tile	Row step	Col step	Matching		Minimi quadrati		Soglia taglio correlazione	Layers	Range quote	
			Dimens. finestra	Punti trovati	Dimens. finestra	Punti scartati				
Mix	1 *	2	2	11	636740	11	570377	0.85 – 0.70	14	-6÷20
	2				633456		16801			-6÷20
	3 §	3	3		759161		2659			-6÷20
Argenta	1	2	2	11	928636	11	1159	0.85 – 0.70	14	-6÷20
	2				406228	\	\			
	3 °	3	3		406228	11	37018			
	4				408535	9	37903			
	5				9	387667	11			
Campagna	1	3	3	11	131446	11	2523	0.85 – 0.70	14	-6÷20
	2				158992		2907		16	-6÷22
	3									

Tabella 6-24 - GeoEye-1: riassunto delle prove di matching eseguite con SISAR e relativi risultati (*: prova eseguita sulle immagini a 11bit, °: prova eseguita limitando la possibilità di spostare un punto durante la fase di ottimizzazione ai minimi quadrati di 0.75px per lato anziché di 1px, §: pre-trattamento delle immagini con applicazione del filtro di Lee)

Ognuna delle prove ha richiesto diverse ore, anche se una differente scrittura dell'algoritmo permetterà di ridurre notevolmente i tempi del processo.

Ottenuti dunque i file testuali con le coppie di coordinate immagine dei punti omologhi, con SISAR si è estratta la nube di punti georeferenziata partendo dall'orientamento ricavato con 40 GCPs tramite il modello rigoroso, fase che richiede circa 10-15 minuti.

La creazione della griglia regolare ed il salvataggio in TIF anche in questo caso sono stati effettuati mediante Global Mapper scegliendo sempre passo della griglia regolare di 2m per coerenza con il modello di riferimento.

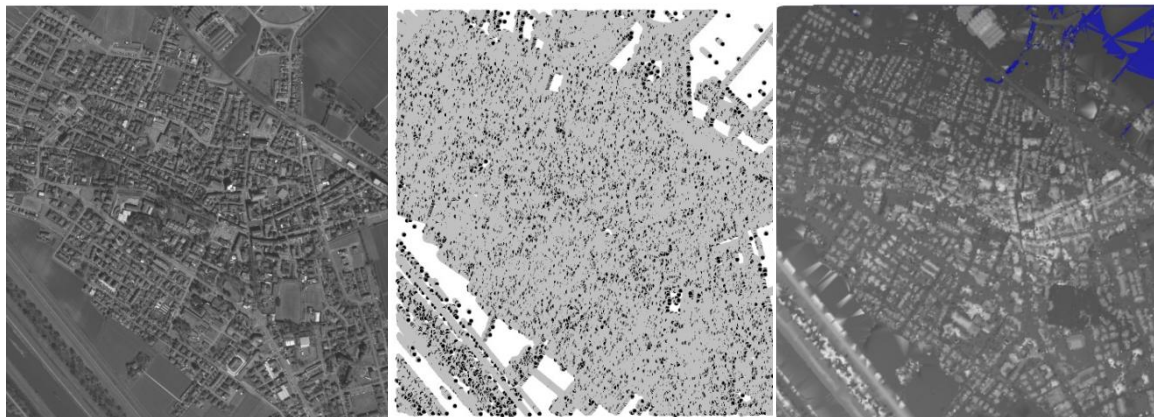


Figura 6-31- GeoEye-1: immagine satellitare (sinistra), punti estratti durante il matching con SISAR (centro) TIF finale per il tile urbano (destra)



Figura 6-32 - GeoEye-1: immagine satellitare (sinistra), punti estratti durante il matching con SISAR (centro) TIF finale per il tile rurale (destra)

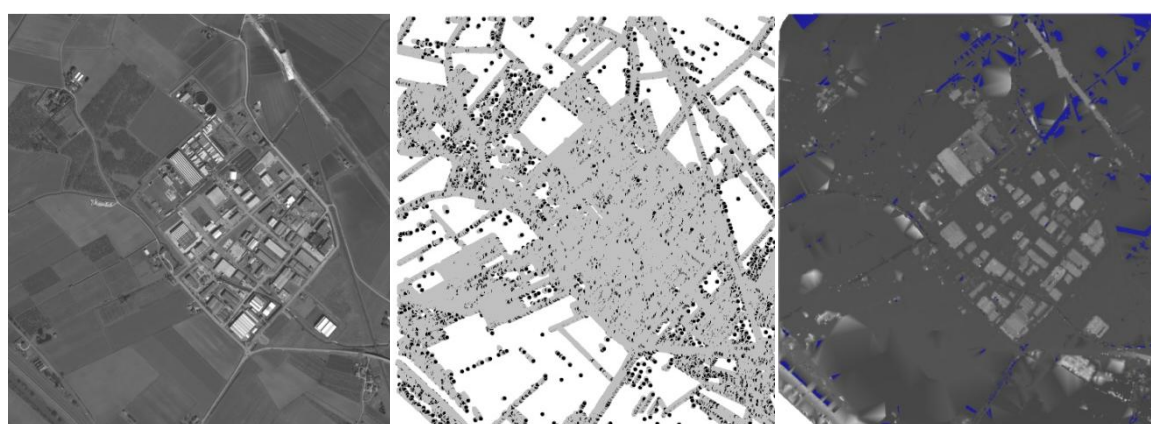


Figura 6-33 - GeoEye-1: immagine satellitare (sinistra), punti estratti durante il matching con SISAR (centro) TIF finale per il tile misto (destra)

Come per OrthoEngine nei campi sono stati trovati pochi punti omologhi, mentre strade, capezzaghe ed aree edificate hanno un ottimo livello di correlazione (Figura 6-31, Figura 6-32, Figura 6-33). Analizzando più in dettaglio i tiles, anche in questo caso si hanno alcuni punti di quota errata, che nella fase di interpolazione hanno creato problemi alterando il valore di quote anche di aree estese. Per quanto riguarda le aree rurali, ciò è dovuto a singoli punti mal correlati (solitamente nelle zone a frutteto) o ad oggetti isolati (alberi e tralicci), spesso unici elementi riconosciuti durante il matching; come si vede in Figura 6-34, in cui al TIF sono stati sovrapposti i punti riconosciuti durante il matching, due punti isolati cui è stata attribuita una quota troppo elevata fanno sì che gran parte dell'appezzamento abbia valori completamente sbagliati (area bianca nella figura): il terreno è infatti ad una quota di circa 2.5m, mentre i due punti riconosciuti hanno quote di circa 11m, ovviamente superiori a normali alberi da frutta. Nessun problema ha invece comportato la presenza del traliccio della linea elettrica ad alta tensione, poiché sono stati identificati punti omologhi anche sul terreno nudo nelle immediate circostanze (punti all'interno del cerchio bianco in Figura) e dunque l'attribuzione dei valori di quota è stata eseguita senza errori.

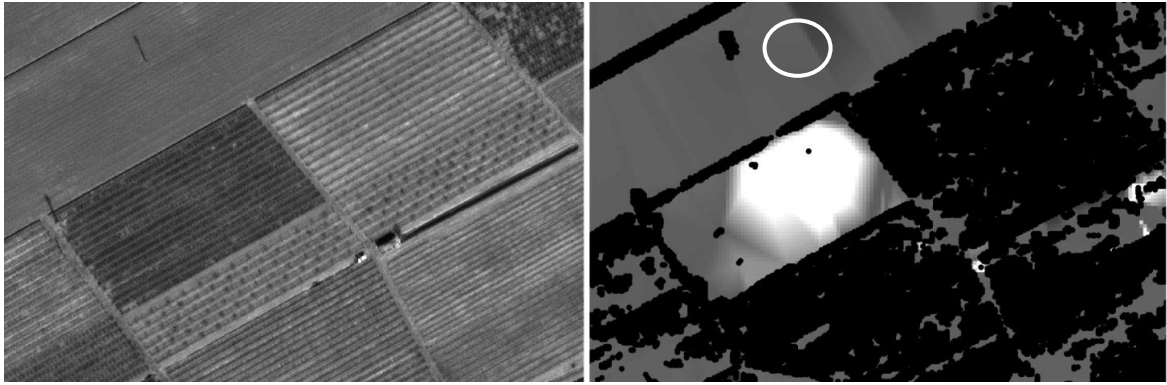


Figura 6-34 - GeoEye-1: immagine satellitare (sinistra) e dettaglio di un DSM estratto con SISAR (destra) in cui si evidenziano i problemi di matching nelle aree rurali

Diverso è il problema nelle aree edificate (Figura 6-35), in cui si hanno punti isolati a quota errata (solitamente quote inferiori a quelle reali di alcuni metri) sia sugli edifici che nelle strade; dato però l'elevato numero di punti riconosciuti ciò ha comportato nel TIF la creazione di molte piccole aree di quota inferiore rispetto alle aree adiacenti (aree blu in figura). Si è dunque editata la nube di punti estratta durante il matching eliminando i punti isolati a quota errata, per poi estrarre nuovamente il file TIF (figura sotto) e la griglia.

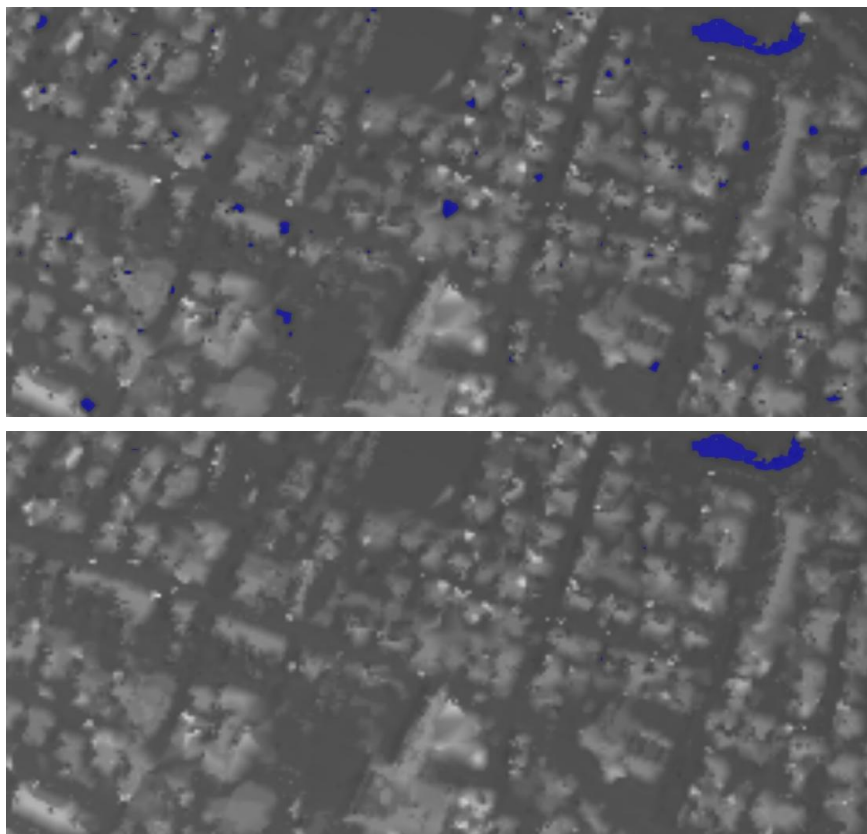


Figura 6-35 - - GeoEye-1: dettaglio di un DSM estratto con SISAR: problemi di matching nelle aree urbane (sopra) e correzione ottenuta filtrando i punti estratti (sotto)

Tutti i modelli così creati ed editati sono stati pertanto validati al fine di valutare la precisione ottenibile.

6.6. Validazione dei DSMs

Anche in questo caso la fase di validazione ha permesso di valutare l'accuratezza raggiungibile con modelli della superficie estratti da immagini satellitari e di ottenere indicazioni sul modello migliore tra tutti quelli generati, in maniera da ottimizzare le fasi di estrazione ed editing, divenute molto più rilevanti in termini di durata delle elaborazioni per via della miglior risoluzione del pixel immagine.

6.6.1. Confronti con punti di controllo

Sono stati impiegati circa 12000 punti derivanti dai seguenti rilievi GNSS (Figura 6-36):

- punti terreno rilevati in modalità stop&go da operatori del Consorzio di Bonifica mediante strumentazione TOPCON Hyper-Pro (4928 punti) (§6.7.1);
- punti terreno e su rilevati arginali rilevati in modalità cinematica e stop&go mediante strumentazione TOPCON GR3 (1890 punti);
- punti stradali rilevati in modalità cinematica da operatori del Consorzio di Bonifica sempre con strumentazione TOPCON Hyper-Pro (4952 punti).

Tutti i punti, rilevati con un'accuratezza 3D di circa 0.3m e con quota ortometrica calcolata mediante VERTO3 (ITALGEO99), sono stati analizzati al fine di eliminare possibili outliers: si sono esclusi punti con GDOP superiore a 6 e punti con dislivelli eccessivi rispetto ai quelli precedente e successivo.

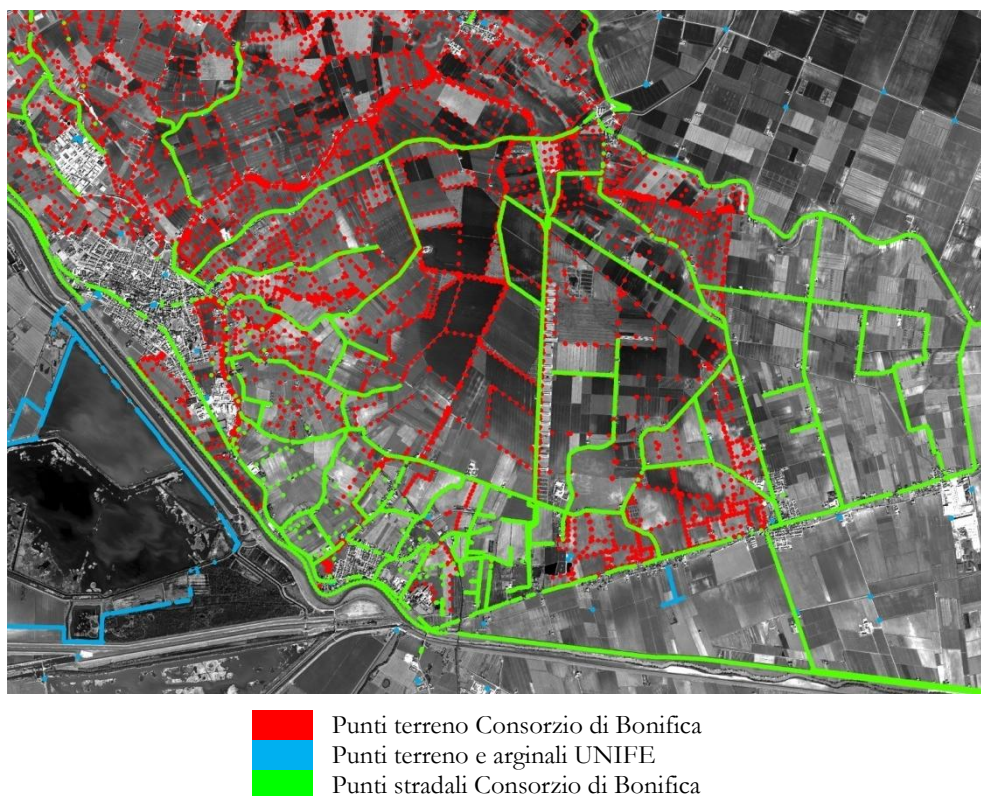


Figura 6-36 - GeoEye-1: punti di controllo rilevati

Al fine di analizzare i residui in funzione del tipo di copertura del suolo [13], i punti così acquisiti sono stati suddivisi in (Figura 6-37):

- punti terreno (anche molti punti acquisiti lungo la rete stradale sono in questa categoria in quanto molte strade sono a livello del piano campagna) (circa 10000 punti);
- punti in aree edificate (principalmente strade interne dei paesi) (circa 500 punti);
- punti in aree alberate (punti acquisiti in modalità stop&go e cinematica nei pressi di frutteti, piccoli boschetti e buona parte del rilievo cinematico effettuato all'interno delle Valli di Campotto) (circa 1250 punti).



■ Punti terreno ■ Punti in aree edificate ■ Punti in aree alberate

Figura 6-37 - GeoEye-1: suddivisione dei punti di controllo in base alla copertura del suolo

Poiché l'estensione dei tiles impiegati per testare SISAR è limitata ed il numero di punti di controllo sarebbe ridotto (e quasi esclusivamente costituito da punti terreno), tale confronto è stato eseguito solamente con i modelli derivati da OrthoEngine.

I dati riportati mostrano i confronti ottenuti come differenza tra valore di quota nel modello e quota rilevata senza scartare alcun punto, riepilogando i residui per il totale dei punti e per le tre coperture del suolo identificate. Come ulteriore confronto si è riportata l'analisi svolta sulle sole parti con informazione di quota estratte da OrthoEngine prima di eseguire le prove di riempimento (Orig), per vedere come queste avrebbero influito sui risultati.

		Tutti i punti: 11250 punti					Aree edificate: 492 punti				
		Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
1px_1-0	Orig	-260.61	52.04	-9.13	28.68	30.09	-104.77	12.78	-2.12	13.74	13.90
	UNIFE	-325.42	52.04	-0.26	4.95	4.95	-4.84	12.78	-0.24	1.24	1.26
	PCI	-150.97	61.06	-0.06	2.10	2.10	-3.55	12.62	-0.19	1.17	1.19
	GIS	-154.39	52.04	-0.16	2.09	2.10	-2.87	12.78	-0.26	1.19	1.22
2px_1-0	Orig	-260.61	36.82	-7.55	26.29	27.35	-103.51	8.04	-0.64	6.61	6.64
	UNIFE	-149.48	36.82	-0.16	2.00	2.00	-2.82	8.04	-0.21	1.10	1.12
	PCI	-152.53	61.05	-0.09	2.10	2.10	-3.08	13.52	-0.19	1.15	1.17
	GIS	-154.47	36.82	-0.16	1.95	1.95	-2.82	8.04	-0.22	1.08	1.10
4px_1-0	Orig	-152.38	14.69	-6.24	23.89	24.69	-103.51	5.59	-0.65	6.59	6.62
	UNIFE	-152.38	14.69	-0.15	1.88	1.89	-3.53	5.59	-0.22	1.02	1.04
	PCI	-152.43	20.86	-0.21	1.85	1.87	-2.65	5.37	-0.20	0.87	0.89
	GIS	-152.38	14.69	-0.17	2.11	2.11	-3.53	5.59	-0.23	0.98	1.01
NIR_1-0	Orig	-147.69	48.18	-0.68	6.76	6.79	-5.78	5.74	-0.28	1.34	1.37
	UNIFE	-147.69	48.18	-0.29	2.82	2.83	-5.78	5.74	-0.28	1.34	1.37
	PCI	-149.70	35.46	-0.23	2.82	2.82	-5.36	7.10	-0.30	1.31	1.34
	GIS	-147.69	48.18	-0.30	2.81	2.83	-5.78	5.74	-0.28	1.34	1.37
2px_RPC_0	Orig	-220.61	24.66	-10.45	37.09	38.54	-63.51	6.07	-0.55	9.13	9.14
	UNIFE	-71.02	52.52	0.00	2.55	2.55	76.61	6.08	-0.09	1.01	1.01
	PCI	-71.96	27.20	0.23	1.93	1.94	77.01	6.07	0.08	0.88	0.88
	GIS	-74.37	24.66	0.12	2.27	2.27	77.01	6.07	0.03	0.93	0.93
2px_RPC_1	Orig	-220.61	24.40	-10.40	39.97	41.30	-63.51	7.06	-0.90	11.04	11.08
	UNIFE	-68.50	24.40	0.00	3.86	3.86	37.86	7.06	-0.12	2.14	2.14
	PCI	-71.75	24.98	0.20	1.93	1.93	77.13	5.87	-0.01	0.88	0.88
	GIS	-74.86	24.40	0.09	2.27	2.27	76.04	7.06	-0.04	0.96	0.96
2px_RPC_2	Orig	-220.61	52.52	-10.74	37.41	38.92	-63.51	6.08	-0.68	9.12	9.15
	UNIFE	-71.02	52.52	-0.02	2.65	2.65	-76.61	6.08	-0.09	1.01	1.01
	PCI	-69.55	52.52	0.15	2.14	2.15	-75.70	7.25	-0.05	1.03	1.03
	GIS	-74.26	52.52	0.03	2.75	2.75	-76.61	6.08	-0.14	0.97	0.98

Tabella 6-25 - GeoEye-1: risultati della validazione con punti GNSS (tutti i punti e soli punti in aree edificate) dei modelli estratti con OrthoEngine

		Aree alberate: 1243 punti					Terreno: 9515 punti				
		Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
1px_1-0	Orig	-260.61	8.60	-1.28	13.55	13.61	-113.36	52.04	-10.51	30.43	32.20
	UNIFE	-146.19	8.60	0.02	4.33	4.33	-352.42	52.04	-0.30	5.14	5.14
	PCI	-150.97	7.86	0.09	4.46	4.46	-16.86	61.06	-0.08	1.60	1.60
	GIS	-154.39	8.60	0.03	4.55	4.55	-17.46	52.04	-0.18	1.55	1.56
2px_1-0	Orig	-260.61	7.59	-0.38	9.45	9.46	-113.36	36.82	-8.85	28.13	29.48
	UNIFE	-149.48	7.59	0.04	4.40	4.40	-28.85	36.82	-0.19	1.45	1.46
	PCI	-152.53	9.23	0.08	4.51	4.51	-15.60	61.05	-0.10	1.58	1.58
	GIS	-154.47	7.59	0.03	4.53	4.53	-11.75	36.82	-0.18	1.32	1.33
4px_1-0	Orig	-152.38	7.28	-0.03	5.30	5.30	-104.68	14.69	-7.34	25.71	26.74
	UNIFE	-152.38	7.28	0.053	4.478	4.48	-22.41	14.69	-0.18	1.23	1.24
	PCI	-152.43	8.09	0.03	4.49	4.49	-17.48	20.86	-0.25	1.18	1.20
	GIS	-152.38	7.28	0.05	4.48	4.48	-100.98	14.69	-0.20	1.60	1.61
NIR_1-0	Orig	-147.69	6.08	-0.33	4.44	4.45	-104.49	48.18	-0.75	7.16	7.20
	UNIFE	-147.69	6.08	-0.33	4.44	4.45	-24.21	48.18	-0.29	2.59	2.60
	PCI	-149.70	6.15	-0.33	4.47	4.48	-23.68	35.46	-0.22	2.58	2.59
	GIS	-147.69	6.08	-0.33	4.44	4.45	-24.21	48.18	-0.29	2.59	2.60
2px_RPC_0	Orig	-220.61	10.66	-0.36	10.27	10.28	-73.36	24.66	-12.27	39.84	41.68
	UNIFE	-71.02	6.56	0.05	4.42	4.42	-44.06	52.52	0.00	2.51	2.51
	PCI	-71.96	10.66	0.04	4.40	4.40	58.71	27.20	0.26	1.34	1.37
	GIS	-74.37	10.66	-0.02	4.47	4.47	-60.98	24.66	0.14	1.85	1.85
2px_RPC_1	Orig	-220.61	7.01	-0.66	11.73	11.75	-73.96	24.40	-12.16	39.64	41.46
	UNIFE	-68.50	7.01	-0.08	4.29	4.29	-59.92	24.40	0.01	3.86	3.86
	PCI	-71.75	8.07	-0.07	4.38	4.38	57.98	24.98	0.24	1.35	1.37
	GIS	-74.86	7.01	-0.08	4.47	4.47	-60.98	24.40	0.12	1.85	1.86
2px_RPC_2	Orig	-220.61	6.56	-0.40	11.06	11.06	-73.36	52.52	-12.60	40.15	42.08
	UNIFE	-71.02	6.56	0.05	4.42	4.42	-44.06	52.52	-0.03	2.39	2.39
	PCI	-69.55	11.17	0.16	4.38	4.38	-54.91	52.52	0.15	1.70	1.70
	GIS	-74.26	6.56	0.06	4.48	4.48	-61.04	52.52	0.03	2.51	2.51

Tabella 6-26 - GeoEye-1: risultati della validazione con punti GNSS (punti in aree alberate e punti terreno) dei modelli estratti con OrthoEngine

Osservando i dati nel complesso, in generale si ha un buon accordo tra le procedure di fill, con valori di media, deviazione standard e RMSE paragonabili tra tutti i modelli estratti: i RMSEs per la città sono dell'ordine dei 2 pixel o di poco superiori, mentre i valori salgono fino a valori del tutto inaccettabili nelle zone alberate (i punti acquisiti sono in alcuni casi a pochi pixel dagli alberi ad alto fusto, per cui nell'attribuzione della quota si risente ancora in maniera eccessiva dell'interpolazione con i valori a quota terreno adiacenti). Il fill con la media di ogni lacuna (UNIFE) applicata al modello con risoluzione di 1 pixel porta nelle zone rurali residui troppo elevati, a dimostrazione dell'eccessivo rumore con un pixel di dimensioni ridotte. In realtà, comunque, come si nota osservando i valori dei

modelli originali e dei picchi minimi e massimi, il dato più rilevante è dato dall'eccessiva presenza di outliers, i cui valori sono solamente mediati applicando i diversi filtri di riempimento.

Anche il modello estratto dalle immagini NIR dà risultati discreti, con residui di poco superiori a quelli dei modelli pancromatici nelle aree edificate, doppi per i punti terreno ed in linea per le zone alberate. Un'ulteriore prova (non riportata in tabella), anche in questo caso ha mostrato come l'uso delle immagini epipolari in ordine invertito non modifichi assolutamente il modello creato.

Per quanto riguarda l'errore abbastanza elevato nelle zone rurali (maggiore di 3 pixel tranne per il DSM a passo 4px) bisogna sottolineare che solo circa 1000 punti sono stati acquisiti all'interno degli appezzamenti; tale residuo non è quindi da attribuire alle procedure di fill, quanto piuttosto alle imprecisioni durante la fase di matching già descritte (§6.5.1). Molti punti sono stati infatti acquisiti al margine dei campi, vale a dire sulle capezzagne o al piede dei piccoli rilevati stradali, quindi proprio laddove il software ha mostrato i maggiori problemi di correlazione, alternando valori errati a quota maggiore od inferiore che hanno poi portato alla creazione delle irregolarità mostrate in precedenza (Figura 6-28) durante la fase di fill automatico; proprio per questo, la procedura implementata in ambiente GIS mostra in questo caso i residui maggiori, poiché più sensibile a tale tipo di errori nel calcolo della media di ogni lacuna.

Per raffinare il confronto cercando di eliminare gli outliers, si è poi eseguita un'analisi al 95% di probabilità (LE95). I risultati sono i seguenti:

		Tutti i punti: 11250 punti					Aree edificate: 492 punti				
		LE95 [m]	Punti esclusi	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	LE95 [m]	Punti esclusi	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
1px	UNIFE	2.50	568	-0.22	0.90	0.93	1.93	25	-0.33	0.75	0.82
	PCI	2.40	565	-0.17	0.87	0.89	1.85	25	-0.27	0.75	0.79
	GIS	2.40	559	-0.22	0.88	0.91	1.89	26	-0.33	0.73	0.80
2px	UNIFE	2.42	569	-0.20	0.88	0.91	1.92	25	-0.32	0.73	0.79
	PCI	2.35	563	-0.18	0.87	0.88	1.80	26	-0.28	0.70	0.75
	GIS	2.32	563	-0.22	0.87	0.89	1.88	25	-0.32	0.72	0.78
4px	UNIFE	2.33	562	-0.19	0.87	0.88	1.83	26	-0.31	0.69	0.75
	PCI	2.20	565	-0.24	0.83	0.86	1.47	25	-0.24	0.63	0.67
	GIS	2.31	568	-0.20	0.87	0.89	1.75	25	-0.30	0.68	0.75
NIR	UNIFE	4.65	561	-0.23	1.49	1.51	2.90	25	-0.25	0.95	0.99
	PCI	4.70	568	-0.24	1.49	1.51	2.40	25	-0.32	0.93	0.98
	GIS	4.65	560	-0.24	1.48	1.50	2.90	25	-0.25	0.95	0.99
2px RPC_0	UNIFE	2.22	563	-0.02	0.82	0.82	1.80	25	-0.21	0.67	0.70
	PCI	1.97	573	0.11	0.69	0.70	1.67	25	-0.02	0.59	0.59
	GIS	1.85	570	0.06	0.70	0.70	1.65	25	-0.09	0.61	0.62
2px RPC_1	UNIFE	2.00	571	0.04	0.72	0.72	1.71	25	-0.17	0.62	0.65
	PCI	1.97	566	0.07	0.71	0.71	1.50	25	-0.12	0.56	0.57
	GIS	1.87	572	0.04	0.71	0.71	1.68	26	-0.16	0.61	0.63

2px RPC_2	UNIFE	1.80	25	-0.21	0.67	0.70	1.65	60	0.09	0.75	0.76
	PCI	1.75	24	-0.19	0.65	0.67	1.73	63	0.15	0.74	0.75
	GIS	1.78	25	-0.21	0.66	0.69	1.65	59	0.09	0.75	0.76

Tabella 6-27 - GeoEye-1: risultati della validazione LE95 con punti GNSS (tutti i punti e soli punti in aree edificate) dei modelli estratti con OrthoEngine

		Aree alberate: 1243 punti					Terreno: 9515 punti				
		LE95 [m]	Punti esclusi	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	LE95 [m]	Punti esclusi	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
1px	UNIFE	2.21	61	0.09	0.99	1.00	2.58	476	-0.26	0.89	0.93
	PCI	2.21	66	0.11	0.95	0.96	2.45	483	-0.19	0.86	0.88
	GIS	2.19	62	0.09	0.99	0.99	2.47	472	-0.25	0.87	0.90
2px	UNIFE	2.17	63	0.10	0.97	0.97	2.50	476	-0.24	0.88	0.91
	PCI	2.24	62	0.09	0.96	0.97	2.38	484	-0.20	0.85	0.88
	GIS	2.17	62	0.10	0.97	0.97	2.37	484	-0.25	0.85	0.89
4px	UNIFE	2.17	64	0.13	0.96	0.97	2.38	475	-0.22	0.85	0.88
	PCI	2.27	61	0.05	0.97	0.97	2.22	473	-0.28	0.81	0.86
	GIS	2.17	64	0.13	0.96	0.97	2.35	485	-0.23	0.85	0.88
NIR	UNIFE	3.40	63	-0.09	1.16	1.16	4.95	482	-0.24	1.56	1.58
	PCI	3.10	63	-0.14	1.14	1.15	5.00	479	-0.25	1.58	1.60
	GIS	3.40	63	-0.09	1.16	1.16	4.95	482	-0.25	1.55	1.57
2px RPC_0	UNIFE	1.64	65	0.09	0.75	0.75	2.36	476	-0.03	0.84	0.84
	PCI	1.47	63	0.05	0.60	0.60	2.05	483	0.13	0.71	0.73
	GIS	1.43	62	0.01	0.61	0.61	1.93	478	0.08	0.72	0.72
2px RPC_1	UNIFE	1.36	62	-0.04	0.52	0.53	2.10	475	0.06	0.75	0.75
	PCI	1.36	62	-0.03	0.53	0.53	2.07	475	0.10	0.74	0.74
	GIS	1.37	62	-0.04	0.52	0.53	1.95	478	0.06	0.73	0.73
2px RPC_2	UNIFE	1.65	60	0.09	0.75	0.76	2.40	479	-0.03	0.85	0.85
	PCI	1.73	63	0.15	0.74	0.75	2.15	479	0.03	0.79	0.79
	GIS	1.65	59	0.09	0.75	0.76	2.11	476	-0.01	0.82	0.82

Tabella 6-28 - GeoEye-1: risultati della validazione LE95 con punti GNSS (punti in aree alberate e punti terreno) dei modelli estratti con OrthoEngine

Anche in questo caso si vede che i modelli sono molto simili, pur mostrando la procedura semi-automatica la soglia di taglio maggiore nella maggior parte dei casi. Al contrario, i modelli editati in OrthoEngine sembrano avere il comportamento migliore sia per le quote di taglio che per gli RMSEs. Analogamente a quanto detto prima, anche l'aumento della dimensione del pixel del modello finale sembra non introdurre variazioni sensibili, con un miglioramento sui residui finali di pochi centimetri incrementando da 1 a 4 pixel il passo della griglia. Infine, anche la banda NIR mostra, nel complesso, residui sufficienti. Non è però possibile pensare ad una procedura come quella implementata con le immagini IKONOS II, in cui si può sostituire ai valori mancanti nel modello pancromatico quelli estratti in questo: pur avendo avuto una percentuale di correlazione di oltre l'80%, proprio in

campagna si hanno i residui più elevati, a dimostrazione del fatto che le informazioni di quota aggiuntive non sempre sono derivate da un matching corretto.

Considerazioni del tutto analoghe possono essere tratte per i modelli ottenuti a partire da orientamento con RFM, che mostrano residui di poco inferiori ai modelli con orientamento mediante metodo rigoroso. In particolare, il modello con polinomio di primo grado sembra essere quello migliore, seppur con variazioni assai contenute.

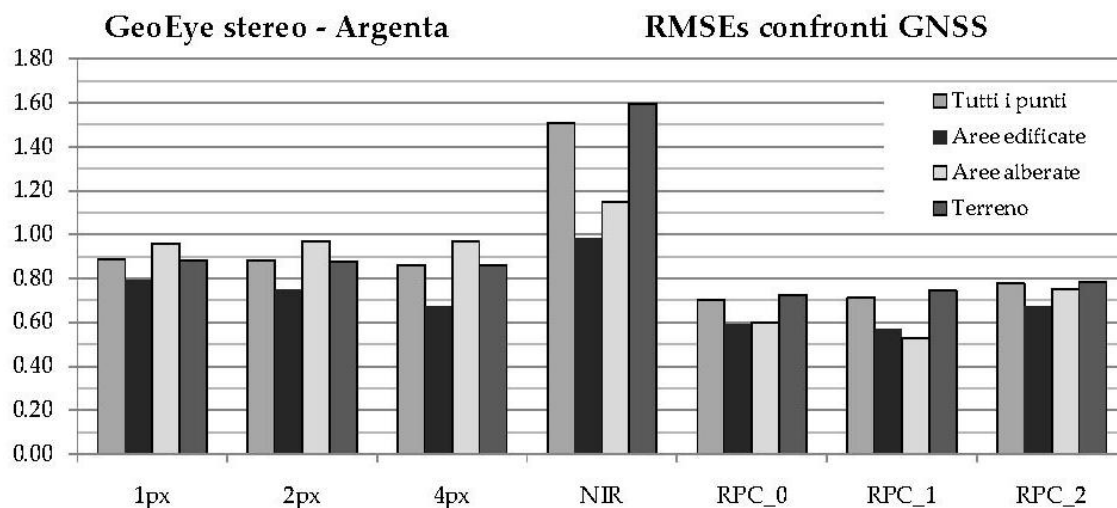


Figura 6-38 - GeoEye-1: RMSEs per i confronti puntuali dei modelli estratti ed editati con OrthoEngine v.10.3

6.6.2. Confronti con DSM di riferimento

Terminata la fase dei controlli puntuali si è proceduto con verifiche utilizzando il modello di riferimento già descritto al paragrafo 5.10.2.1, testando sia i modelli generati da OrthoEngine che da SISAR. Soprattutto per quanto riguarda i primi, però, tali test sono da ritenersi meno significativi rispetto a quelli con i punti GNSS, per via di un'anomalia riscontrata a posteriori nel modello, frutto di una non corretta unione delle singole porzioni derivate dalle elaborazioni delle immagini fotogrammetriche; i tiles estratti per le elaborazioni con SISAR sono invece risultati in un'area omogenea del modello.

1. DSMs estratti con OrthoEngine

I risultati ottenuti come differenza tra il modello in esame e quello di riferimento sono i seguenti:

	PAN_1px					PAN_2px				
	Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
Orig	-41.18	62.05	-0.47	2.98	3.01	-41.18	62.05	-0.47	2.98	3.02
UNIFE	-128.44	62.05	-0.67	3.06	3.13	-128.44	62.05	-0.66	3.06	3.13
PCI	-55.46	62.11	-0.43	3.96	3.99	-55.44	61.90	-0.46	3.77	3.80
GIS	-41.18	62.05	-0.67	2.54	2.63	-41.18	62.05	-0.67	2.54	2.63
UNIFE*	-128.44	29.14	-0.91	3.10	3.23	-128.44	29.14	-0.91	3.10	3.23
PCI*	-55.46	62.05	-0.41	4.68	4.69	-55.00	62.07	-0.44	4.49	4.51
GIS*	-33.36	27.52	-0.91	1.87	2.07	-33.36	27.52	-0.91	1.87	2.07

	PAN_4px					NIR				
	Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
Orig	-28.99	61.22	-0.63	2.60	2.67	-49.06	62.11	-0.60	5.19	5.22
UNIFE	-51.63	61.22	-0.13	2.38	2.38	-49.06	62.11	-0.47	5.01	5.03
PCI	-41.19	60.82	-0.07	2.45	2.45	-56.64	62.11	-0.51	5.70	5.72
GIS	-38.73	62.08	-0.58	2.49	2.56	-49.06	62.11	-0.66	5.02	5.06
UNIFE*	-51.63	23.37	-0.38	1.65	1.69	-42.59	34.57	0.29	3.22	3.23
PCI*	-41.19	60.82	-0.17	3.74	3.75	-56.64	61.35	0.37	9.11	9.12
GIS*	-31.43	19.61	-0.77	1.61	1.78	-29.75	18.07	-1.25	2.70	2.97

Tabella 6-29 - GeoEye-1: risultati della validazione con il DSM di riferimento per i modelli estratti con OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso (* rappresenta confronti effettuati nelle sole aree editate)

Analizzando i residui complessivi, il valore dei RMSEs è circa doppio per tutti e quattro i modelli analizzati rispetto ai confronti puntuali (anche per quello non editato), con valori della media sempre superiori in modulo ai precedenti, che però sembrerebbero essere derivanti dall'imprecisione presente nel modello di riferimento. Come osservato anche in precedenza, l'aumento di rumore riducendo la dimensione del modello è poco significativa, come mostrato dai risultati del modello a 1 e 2 pixel: essendo però il modello di riferimento una maglia di 2m (corrispondenti a 4 pixel dei modelli estratti) questo confronto è dunque servito solamente a cercare eventuali trend di errore non visibili nei confronti puntuali o zone con residui particolarmente elevati. In questo caso si vede però come il fill eseguito con OrthoEngine dia sempre i residui più elevati, mentre le due procedure eseguite in GIS diano risultati più comparabili (con valori comunque solitamente migliori per quella automatica). Il parametro più significativo da analizzare è infatti proprio rappresentato dai residui delle sole aree editate (indicate con * in tabella): i valori ottenuti con OrthoEngine sono sempre più del doppio rispetto a quelli ottenuti in ArcMap. Nonostante dunque i valori medi siano paragonabili a quelli degli altri modelli, gli errori di matching mostrati in precedenza (Figura 6-27) si ripercuotono nella fase di editing creando irregolarità in terreni omogenei messe chiaramente in evidenza dall'aumento di deviazione standard in tabella.

Per i modelli estratti a partire da orientamenti con RFM si ha invece:

	ordine_0_2px					ordine_1_2px					ordine_2_2px				
	Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	Min [m]	Max [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
Orig	-40.33	72.06	-0.42	2.94	2.97	-40.36	71.78	-0.45	2.97	3.00	-40.27	72.10	-0.46	3.07	3.10
UNIFE	-139.96	72.09	-0.78	3.58	3.66	-165.92	71.78	-0.77	3.57	3.66	-165.49	72.10	-1.04	4.51	4.62
PCI	-54.28	72.06	-0.38	3.80	3.82	-50.03	71.78	-0.43	3.47	3.49	-55.01	72.10	-0.41	3.90	3.92
GIS	-40.33	72.06	-0.58	2.49	2.56	-40.36	71.78	-0.59	2.54	2.61	-40.27	72.10	-0.60	2.61	2.68
UNIFE*	-139.96	72.09	-0.99	3.54	3.67	-165.92	39.94	-1.14	4.10	4.26	-165.49	43.97	-1.68	5.59	5.83
PCI*	-54.28	71.02	-0.34	4.56	4.57	-55.01	71.50	-0.39	4.58	4.60	-55.01	71.67	-0.35	4.60	4.62
GIS*	-31.61	20.57	-0.78	1.80	1.96	-36.24	22.06	-0.75	1.88	2.02	-32.32	31.06	-0.78	1.92	2.07

Tabella 6-30 - GeoEye-1: risultati della validazione con il DSM di riferimento per i modelli estratti con OrthoEngine v.10.3, RFM (* rappresenta confronti effettuati nelle sole aree editate)

Anche per i modelli con orientamento eseguito con RFM i residui sono paragonabili a quelli appena descritti per il modello rigoroso e dunque più che raddoppiati rispetto ai confronti puntuali; l'editing automatico di ArcMap dà ancora i migliori risultati e, coerentemente con i confronti puntuali, la procedura semi-automatica mostra invece residui più elevati, paragonabili a quelli ottenuti con OrthoEngine anche nelle sole aree editate. Pur essendo i valori molto simili tra di loro, si nota comunque nel complesso un atteso peggioramento dei valori per il polinomio di secondo ordine.

Passando ad un'analisi LE95, si ha:

	4PX						NIR					
	Totale punti	LE95 [m]	Punti esclusi	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	Totale punti	LE95 [m]	Punti esclusi	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
UNIFE	21803720	4.20	1093780	-0.23	1.37	1.39	21816834	10.50	1102831	-0.38	3.02	3.05
PCI	21441735	4.50	1092427	-0.17	1.38	1.39	21202205	12.00	1068124	-0.40	3.44	3.46
GIS	21803717	4.20	1093704	-0.23	1.37	1.39	21226334	12.00	1065156	-0.58	3.16	3.21
	2PX											
	Totale punti	LE95 [m]	Punti esclusi	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]						
PCI 16(1)	21437501	5.40	1071189	-0.33	1.53	1.57						
PCI 16(2)	21444477	9.00	1085177	-0.25	1.88	1.89						
PCI 40	21442457	5.00	1084071	-0.14	1.47	1.48						

Tabella 6-31 - GeoEye-1: risultati della validazione LE95 con il DSM di riferimento per i modelli estratti con OrthoEngine v.10.3 con modello rigoroso

Scartati gli outliers, i valori mostrano nuovamente valori comparabili tra le tre procedure di riempimento, in accordo con i confronti puntuali, anche se nel complesso si ha un peggioramento dei risultati con aumento delle deviazioni standard a valori di poco inferiori ai 3 pixel e quote di taglio quasi doppie per i modelli derivanti da immagini pancromatiche, con valori ancora più elevati (6 pixel per gli RMSEs e oltre 10m come quota di taglio) per i modelli NIR; anche in tale verifica si vede comunque che i risultati peggiori sono ottenuti sempre con modelli editati con OrthoEngine (unica anomalia è in questo caso il valore di taglio per l'immagine NIR del modello editato automaticamente in ambiente GIS elevato e paragonabile a quello di OrthoEngine). Un ulteriore confronto, eseguito però solo per i modelli editati in OrthoEngine, è stato condotto per valutare, come mostrato in precedenza, eventuali trend anche per i modelli estratti con pixel di risoluzione inferiore. Impiegando così il modello estratto a passo 2 pixel con i diversi modelli di orientamento, si vede una dipendenza proprio dalla distribuzione dei GCPs: in riferimento al modello con 40 GCPs si vede come la prima distribuzione con 16 GCPs dia residui e quota di taglio paragonabili, mentre la seconda distribuzione mostri un andamento molto più irregolare.

Per il modello polinomiale si ha, confrontando solamente i modelli editati con OrthoEngine e concentrando l'attenzione sulle differenti distribuzioni di GCPs:

	ordine_0_2px						ordine_1_2px					
	Totale punti	LE95 [m]	Punti esclusi	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	Totale punti	LE95 [m]	Punti esclusi	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
PCI 16(1)	21466108	5.00	1087492	-0.01	1.33	1.33	21463123	5.10	1092783	-0.03	1.38	1.38
PCI 16(2)	21429765	4.90	1077012	-0.00	1.31	1.31	21464627	5.10	1086007	0.01	1.37	1.37
PCI 40	21464938	5.10	1092052	-0.09	1.35	1.35	21463400	5.10	1081997	-0.12	1.37	1.38
	ordine_2_2px						ordine_1_4px					
	Totale punti	LE95 [m]	Punti esclusi	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	Totale punti	LE95 [m]	Punti esclusi	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
PCI 16(1)	21458369	5.50	1085347	-0.17	1.52	1.53	\	\	\	\	\	\
PCI 16(2)	21464786	5.30	1092856	-0.14	1.46	1.46	\	\	\	\	\	\
PCI 40	21458835	5.30	1078988	-0.08	1.49	1.49	21434168	4.80	1071575	-0.14	1.31	1.32

Tabella 6-32 - GeoEye-1: risultati della validazione LE95 con il DSM di riferimento per i modelli estratti ed editati con OrthoEngine v.10.3, RFM

I valori mostrano, a differenza di quanto appena visto per il metodo rigoroso, un buon accordo indipendentemente dal numero e dalla distribuzione dei GCPs: quote di taglio e RMSEs hanno variazioni minime, ed anche in questo caso si assiste ad un progressivo incremento dei residui all'aumentare del grado del polinomio. Per entrambi i modelli, estratti a 2 e 4 pixel, i risultati si dimostrano migliori in termini sia di differenze massime accettate che di residui.

2. DSMs estratti con SISAR

I risultati su tutti i modelli estratti e descritti in precedenza (Tabella 6-24) sono i seguenti:

Tile	Modello	Totale punti	LE95 [m]	Punti esclusi	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	
mix	grid	1	544306	6.25	27416	0.05	1.54	1.54
		2	544263	6.15	27407	0.14	1.53	1.54
		3	539901	7.80	27099	0.41	2.09	2.13
	punti	2	633444	5.85	31668	0.27	1.43	1.46
argenta	grid	1	547241	6.90	27460	0.73	2.00	2.13
		1_edit	547190	6.75	27629	0.76	1.95	2.10
		2	537480	7.20	26928	1.12	1.93	2.23
		3	537665	7.15	27192	1.12	1.94	2.24
		4	541724	7.15	27272	1.11	1.94	2.24
	5	537587	8.10	27087	1.20	2.16	2.47	
	punti	1	928499	6.35	46606	0.70	1.96	2.08
		1_edit	923907	6.15	46745	0.71	1.92	2.04
	campagna	grid	1	530694	2.70	26570	-0.02	1.11
2			531084	2.56	27029	0.12	1.00	1.01
3			530912	2.44	26664	0.17	0.97	0.98
punti		3	162652	3.03	8178	0.55	1.14	1.26

Figura 6-39 - GeoEye-1: risultati della validazione LE95 con il DSM di riferimento per i modelli estratti con SISAR, modello rigoroso

Inizialmente i test sono stati eseguiti analizzando la griglia regolare estratta a passo 2m (indicati con “grid” in tabella). Per quanto riguarda il tile in area mista si vede come la prova con le immagini ad 11bit e quella ad 8bit diano gli stessi risultati; un netto peggioramento si è invece avuto applicando all’immagine il filtro di Lee, che ha comportato un aumento del rumore ed una peggior identificazione dei capannoni nell’area industriale, senza peraltro migliorare il riconoscimento delle aree alberate e coltivate (il filtro comporta uno smoothing e dunque si pensava potesse rendere più agevole il matching proprio nelle aree verdi, riducendo un po’ l’eccessiva texture delle immagini originali). Nell’area urbana si vede come i migliori risultati siano stati ottenuti con il modello con step di movimento della finestra di 2 pixel, ovviamente con un incremento dei valori una volta filtrati i punti errati di quota negativa descritti nel Paragrafo 6.5.2 (Figura 6-35). Un passo di 3 pixel comporta un maggior rumore, così come soprattutto il rimpicciolimento della finestra di ricerca (modello 5), mentre il contributo del Least Square (anche come dimensione della finestra e incidenza nello spostamento del punto omologo in fase di raffinamento) comporta l’eliminazione di una piccola percentuale di punti e sembra non incidere sulla qualità del risultato. Infine, le prove sul tile rurale mostrano come un’ottimizzazione delle quote dei livelli su cui calcolare le trasformazioni affini per la ricerca dei punti omologhi comporti un miglioramento dei residui: su un terreno pianeggiante e con coperture omogenee, infatti, i migliori risultati si sono ottenuti raffittendo i livelli per le quote più prossime al piano campagna, lasciando meno livelli con distanze maggiori per l’identificazione dei pochi edifici e delle zone con vegetazione.

Ottenuti dunque questi primi buoni risultati, si è deciso di analizzare direttamente la nube di punti estratta da SISAR (indicati con “punti” in tabella): impiegando Global Mapper, infatti, i punti vengono semplicemente triangolati prima della creazione della griglia, dunque errori isolati o aree con poche informazioni vengono approssimate in maniera eccessiva. Sono stati pertanto testati i modelli che avevano fornito i risultati migliori con la griglia: per quanto riguarda l’area urbana e quella mista (in cui, come si può vedere, la creazione della griglia ha comportato una riduzione del numero di punti identificati durante il matching, concentrati principalmente nelle aree edificate) si ha un miglioramento di circa 0.1m sui residui e differenze massime accettate tra modello in esame e riferimento di circa 0.4-0.5m inferiori. Nell’area di campagna, al contrario, i punti riconosciuti nella fase di matching sono circa un terzo di quelli della griglia ed i risultati peggiorano: come descritto in precedenza (Figura 6-34) alcuni errori grossolani sono stati compiuti durante il matching e, dato il numero inferiore di punti in esame, tali errori incidono sulla qualità dei risultati.

Un’ulteriore verifica è poi stata condotta sul tile urbano, in quanto il valore dei RMSEs risulta fortemente influenzato anche dalla morfologia del terreno, aspetto che si enfatizza proprio in aree costruite (Figura 6-40). L’andamento reale della superficie, ben modellato dai singoli punti rilevati, viene degradato nella fase di verifica, in cui si ha un’interpolazione tra le quote di punti adiacenti del modello di riferimento per valutare la differenza in quota di quello in esame. In questa fase

ovviamente il profilo reale della superficie non può essere riprodotto in maniera fedele, per cui si possono introdurre errori elevati che devono essere filtrati.

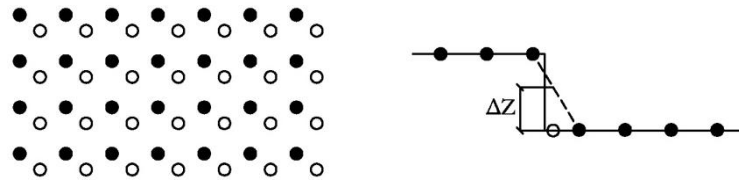


Figura 6-40 - Errori nella modellazione della superficie in fase di interpolazione: il modello di riferimento (●) e quello da esaminare (○) non si corrispondono in planimetria (a sinistra); durante la fase di interpolazione per il calcolo delle differenze di quota il profilo reale del terreno (linea continua) non è descritto correttamente dai punti della griglia, per cui il punto del modello da esaminare, seppur corretto, mostra un ΔZ errato che deve essere filtrato (a destra)

Modello	Totale punti	LE95 [m]	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
1_edit_*	290104	3.75	0.78	1.27	1.49

Tabella 6-33 - GeoEye-1: risultati della validazione per il tile urbano estratto con SISAR valutando anche errori di modellazione della superficie

Analizzando dunque anche la pendenza tra punti adiacenti ed eliminando tutti i punti legati a valori troppo elevati, il numero di punti esaminati è calato in maniera considerevole, ma si è avuta la certezza che la loro posizione in ambedue i modelli fosse corretta, quindi non in aree con interpolazione di quota tra punti a livello stradale e punti di sommità degli edifici. I risultati mostrano un miglioramento di 0.6m sul RMSE e un gap massimo di 3m inferiore con il modello di riferimento rispetto all'analisi complessiva effettuata sull'intero set di punti estratti.

Oltre ai modelli estratti con SISAR si sono estratti i medesimi tiles anche sui modelli derivati da OrthoEngine, in maniera da avere un confronto non solo con il modello di riferimento ma anche tra i due software. I risultati ottenuti sono i seguenti:

		4 px						NIR					
		Totale punti	LE95 [m]	Punti esclusi	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]	Totale punti	LE95 [m]	Punti esclusi	Mean [m]	StDev [m]	RMSE [m]
Argenta	UNIFE	560944	5.75	28289	0.69	1.69	1.82	560969	6.45	28492	0.53	2.22	2.28
	PCI	560969	5.75	28222	0.63	1.79	1.89	560969	6.55	28442	0.57	2.31	2.38
	GIS	560944	5.75	28289	0.69	1.69	1.82	560969	6.40	28287	0.54	2.19	2.26
Campagna	UNIFE	559825	1.85	28300	-0.39	0.62	0.73	560042	6.25	28195	-0.15	2.17	2.17
	PCI	560042	1.93	28433	-0.41	0.65	0.77	560042	6.30	28010	-0.08	2.17	2.17
	GIS	559825	1.85	28305	-0.39	0.62	0.73	560042	6.15	28521	-0.14	2.11	2.12
Mix	UNIFE	560591	4.45	28332	0.75	1.15	1.37	560998	6.25	28312	0.69	2.01	2.13
	PCI	556756	4.85	28122	0.68	1.22	1.40	525049	6.20	26555	0.75	1.99	2.13
	GIS	560591	4.45	28331	0.75	1.15	1.37	525798	6.25	26519	0.69	2.00	2.11

Figura 6-41 GeoEye-1: risultati della validazione LE95 con il DSM di riferimento per i tiles estratti con OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso

Dal confronto su aree di estensione ridotta e con copertura omogenea si vede come i risultati ottenuti con OrthoEngine migliorino per ambedue i modelli rispetto quanto mostrato al paragrafo precedente: i valori rimangono più elevati nelle aree edificate a causa di difficoltà nella fase di matching, mentre nelle aree rurali, editate e filtrate dagli errori grossolani, i risultati danno addirittura valori dell'ordine di 1.5 pixel per il modello pancromatico.

Dal confronto con SISAR, si vede come i due software diano risultati nel complesso paragonabili, anche se OrthoEngine ha valori leggermente inferiori (di circa 0.15-0.25m) per i RMSEs. I valori più elevati relativi alle massime differenze accettate in SISAR sono da imputare, come detto, alla semplice triangolazione effettuata sulla nube di punti prima dell'estrazione della griglia. In aggiunta, si ribadisce che, pur essendo stati estratti i tiles in aree in cui il modello di riferimento sembra essere omogeneo e privo di errori di fusione delle singole porzioni derivate dalle immagini acquisite, un'ulteriore verifica impiegando i punti GNSS per validare il modello di riferimento ha mostrato RMSEs sui residui dell'ordine di 0.5-0.6m.

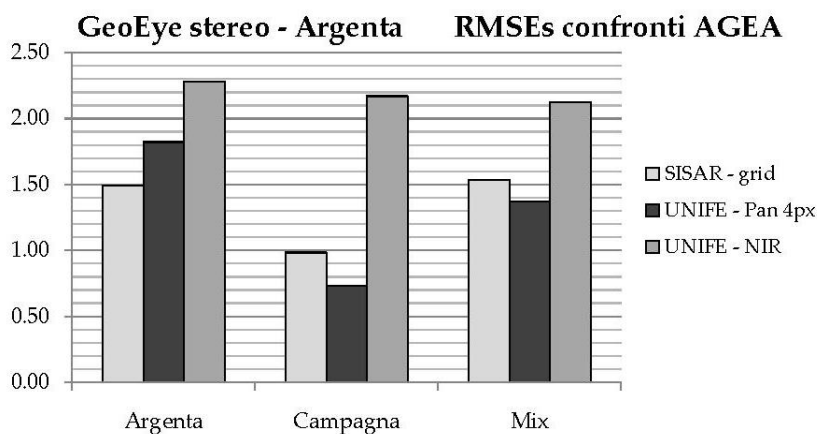


Figura 6-42 - GeoEye-1: confronto tra i RMSEs per i modelli estratti con SISAR e OrthoEngine per i tre tiles

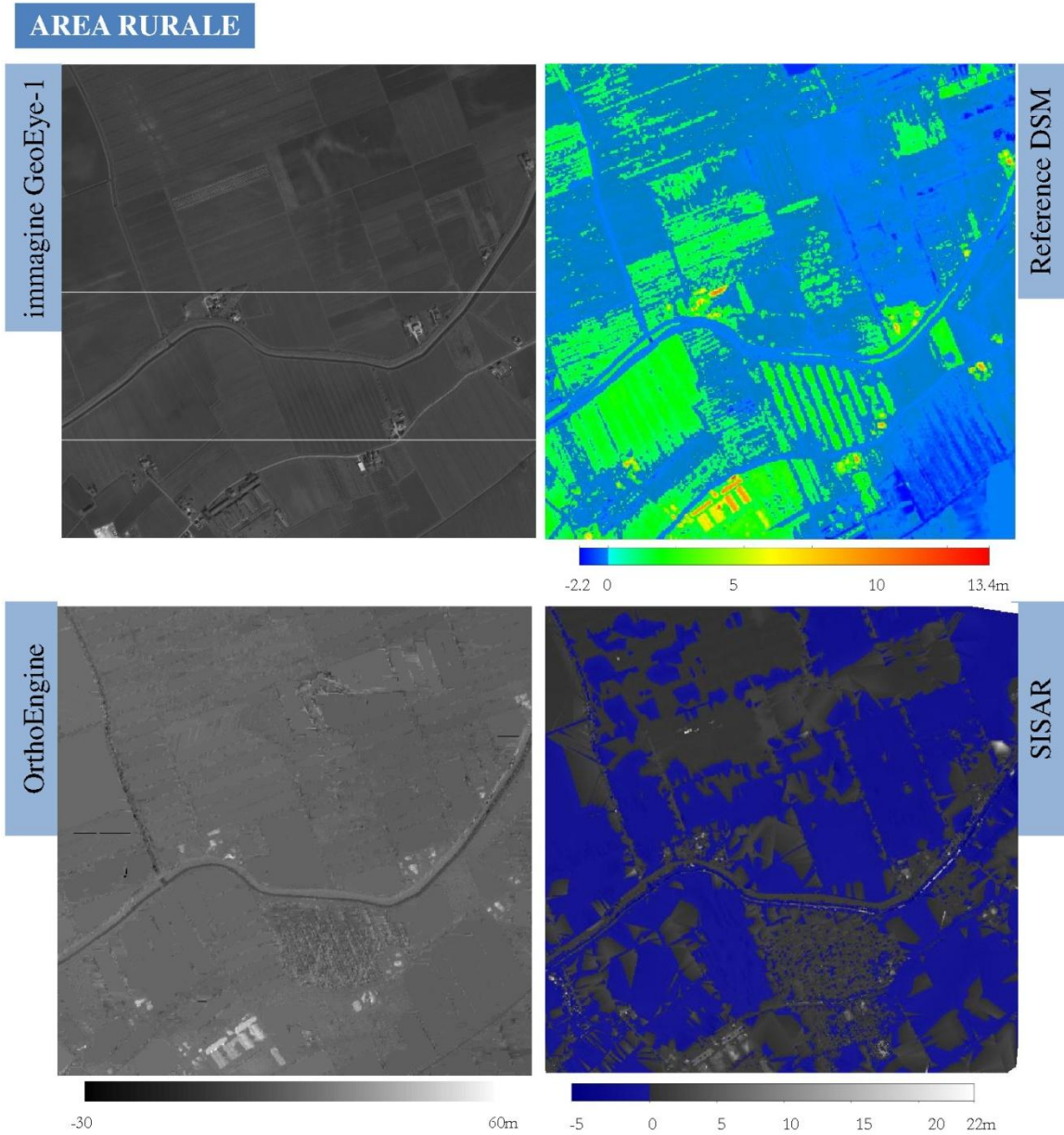


Figura 6-43 - GeoEye-1: visualizzazione dei dati di riferimento e dei DMSs estratti per il tile rurale

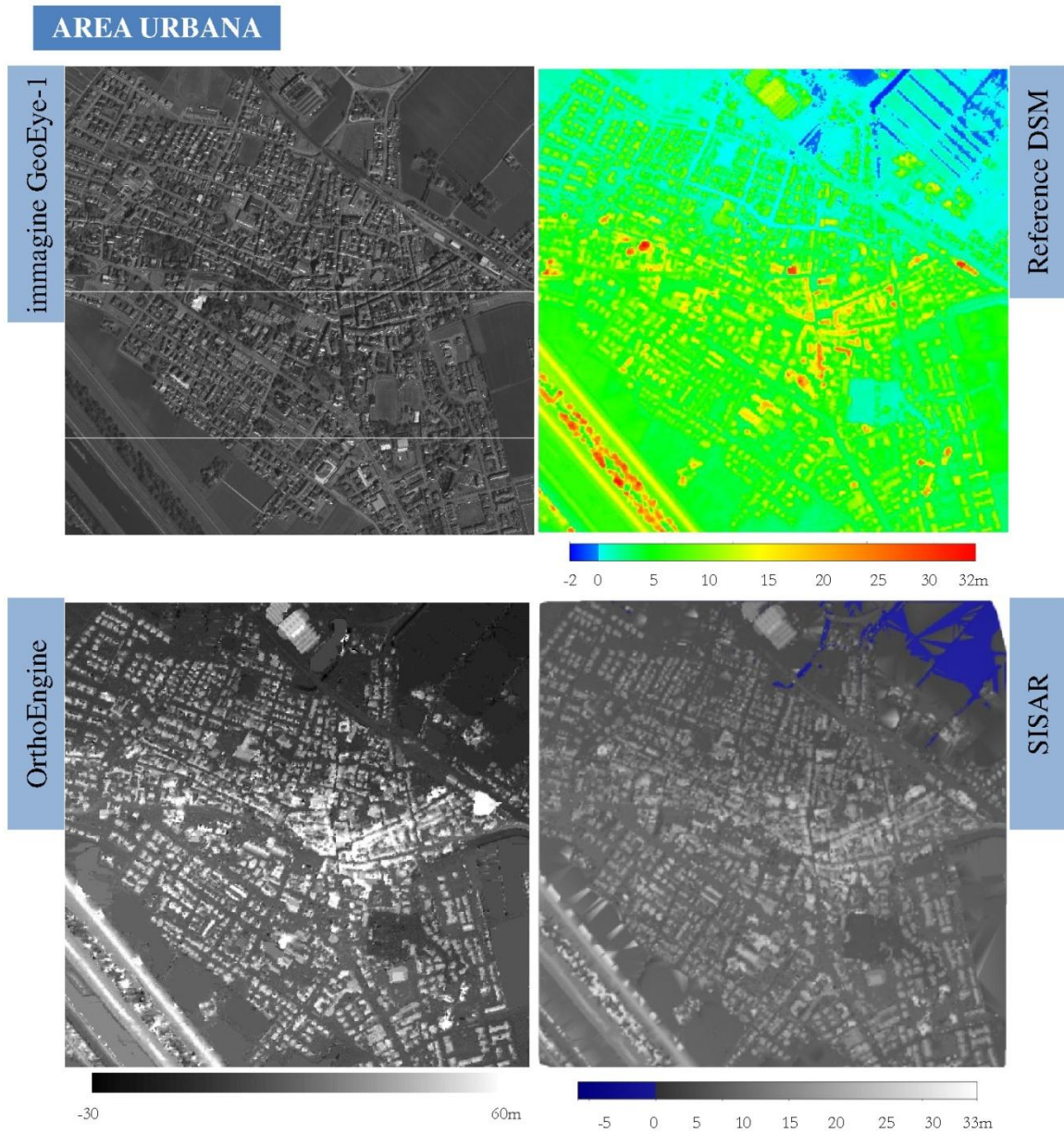


Figura 6-44 - GeoEye-1: visualizzazione dei dati di riferimento e dei DMSs estratti per il tile città

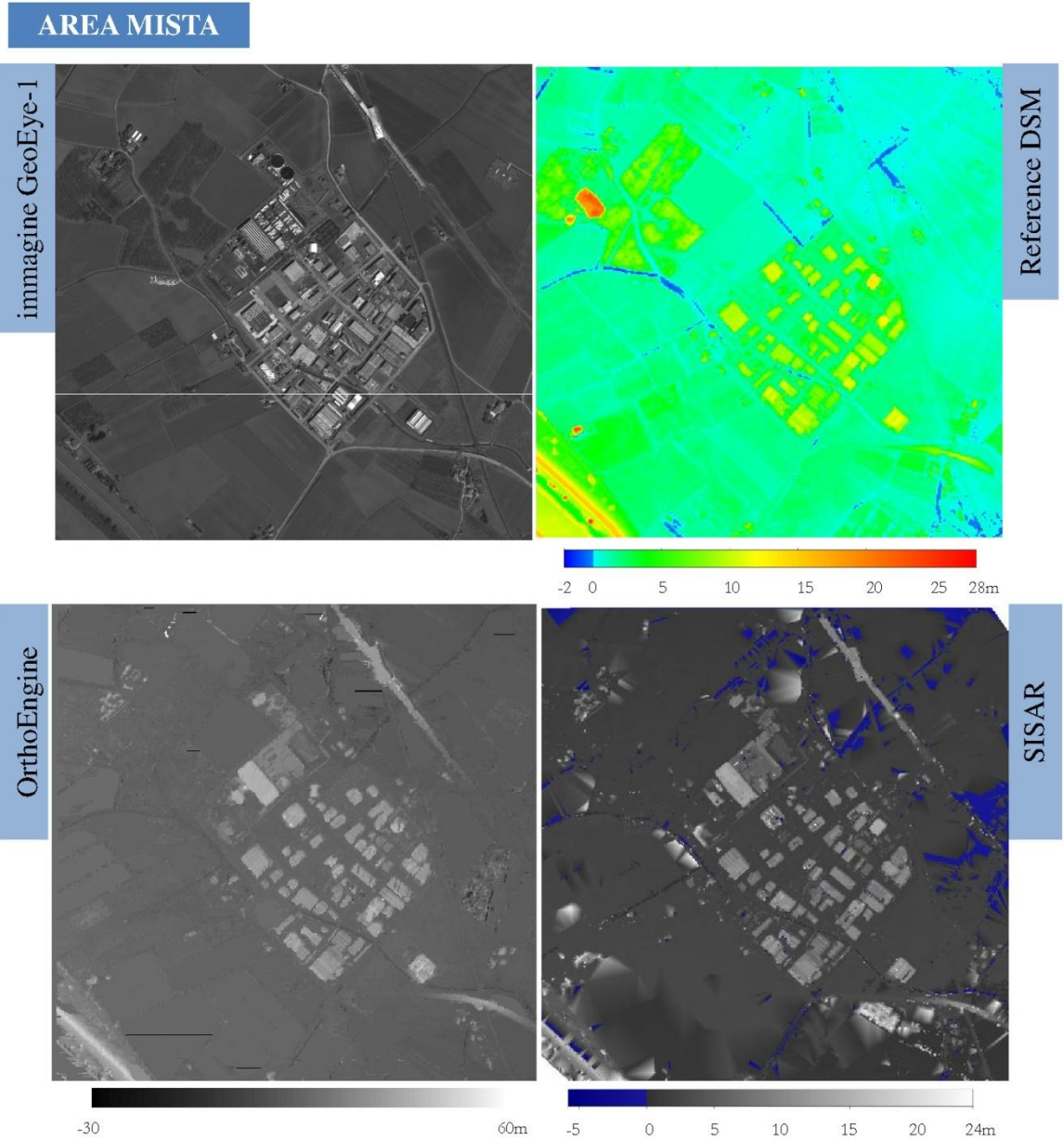


Figura 6-45 - GeoEye-1: visualizzazione dei dati di riferimento e dei DMSs estratti per il tile misto

6.6.3. Livello di precisione dei modelli estratti

Calcolato il LE95 in accordo con le specifiche CISIS (§4.6), i valori ottenuti, il livello di precisione corrispondente e le relative tolleranze sono le seguenti:

Confronti puntuali						
Modelli	Edifici		Campo aperto		Alberi	
	LE95	Livello (Tolleranza)	LE95	Livello (Tolleranza)	LE95	Livello (Tolleranza)
Pancromatici_rigorosi	~3m	3 (3m)	~3.5m	2 (4m)	~4m	3 (0.5 h media alberi)
Pancromatici_RFM	~3m	3 (3m)	~3m	2 (4m)	~3m	3 (0.5 h media alberi)
NIR_rigorosi	~3.5m	2 (5m)	~6m	1 (10m)	~4.5m	3 (0.5 h media alberi)
Confronti con DSM di riferimento						
Modelli	Edifici		Campo aperto			
	LE95	Livello (Tolleranza)	LE95	Livello (Tolleranza)		
OrthoEngine	~3.5m	2 (5m)	~1.5m	3 (2m)		
SISAR	~4m	2 (5m)	~2m	3 (2m)		

Tabella 6-34 - GeoEye-1: livelli di precisione dei modelli estratti

Al momento, quindi, nessuno dei modelli estratti con entrambi i software può essere impiegato per modellazioni idrauliche; applicazioni principali per tali livelli di precisione sono infatti la generazione di ortofoto (scala 1:10000 e 1:5000), studi ambientali e delimitazione dei bacini idrografici.

6.6.4. Confronti tra DSM

I confronti precedenti non hanno mostrato particolari trend dei modelli estratti, ma sono comunque state eseguite ulteriori verifiche (con differenze tra coppie di modelli generati) per valutare se la distribuzione e la numerosità dei punti di controllo influiscono sul modello estratto (in accordo con quanto fatto per le immagini di Ferrara, §5.10.3).

Per quanto riguarda i modelli rigorosi, tre sono stati i confronti eseguiti utilizzando i modelli editati in OrthoEngine:

Risoluzione	Modello 1	Modello 2
2 px	40 GCPs	16 GCPs – distrib.1
	40 GCPs	16 GCPs – distrib.2
	16 GCPs – distrib.1	16 GCPs – distrib.2

Tabella 6-35 - Geoeye-1: riassunto dei confronti relativi eseguiti tra i modelli rigorosi estratti alla ricerca di possibili trend

Anche da questo confronto non si notano comportamenti anomali, come mostrato nelle figure seguenti, in cui sono state identificate le 3 seguenti classi per visualizzare gli scarti:

	min ÷ -0.25 [m]
	-0.25 ÷ 0.25 [m]
	0.25 ÷ max [m]

Si può vedere come il modello con 16 GCPs con la distribuzione 2 risulti a quota maggiore sugli argini e nella zona agricola a Nord-Est rispetto al corrispondente con la distribuzione 1 (Figura 6-48), ed entrambi a quota inferiore nella zona inferiore rispetto al modello estratto con 40 GCPs (Figura

6-46, Figura 6-47). I risultati delle analisi statistiche (Tabella 6-36) mostrano che meno del 40% dei pixel ha differenze inferiori a 0.5m, e che, nel complesso, nell'intervallo ± 2 pixel è contenuto l'80% dei pixel; non si notano errori grossolani inerenti al variare del numero e della distribuzione dei GCPs, ma si può comunque concludere che la procedura di matching di OrthoEngine risulta molto rumorosa: le differenze tra i residui durante la fase di orientamento erano infatti di circa 0.1m (§0), e dunque non giustificano variazioni così marcate tra i modelli prodotti.

Modello 1	Modello 2	$-0.25m \leq \Delta \leq 0.25m$ [%]	$-0.50m \leq \Delta < -0.25m$ $0.25m < \Delta \leq 0.50m$ [%]	$-1.00m \leq \Delta < -0.50m$ $0.50m < \Delta \leq 1.00m$ [%]	$-1m \leq \Delta$ $\Delta \leq 1m$ [%]
40 GCPs	16 GCPs distrib.1	37	22	19	78
40 GCPs	16 GCPs distrib.2	37	22	21	80
16 GCPs distrib.1	16 GCPs distrib.2	32	23	21	76

Tabella 6-36 - GeoEye-1: residui tra i modelli rigorosi estratti ed editati con OrthoEngine v.10.3



Figura 6-46 - Geoeye-1: differenza DSM 40GCPs - DSM 16 GCPs distribuzione 1



Figura 6-47 - Geoeye-1: differenza DSM 40GCPs - DSM 16 GCPs distribuzione 2



Figura 6-48 - Geoeye-1: differenza DSM 16 GCPs distribuzione 1 - DSM 16 GCPs distribuzione 2

Per quanto riguarda i modelli ottenuti con orientamento eseguiti con RFM, i confronti eseguiti sono stati i seguenti:

Risoluzione	GCPs	Modello 1	Modello 2
2 px	40	ordine 0	ordine 1
		ordine 0	ordine 2
		ordine 1	ordine 2
	16 distrib.1	ordine 0	ordine 1
		ordine 0	ordine 2
		ordine 1	ordine 2
	/	40 GCPs - ordine 1	16 GCPs distrib1 - ordine 1

Tabella 6-37 - Geoeye-1: confronti relativi eseguiti tra i modelli polinomiali estratti alla ricerca di possibili trend

Il comportamento tra i modelli estratti con 16 e con 40 GCPs è stato analogo, per cui si riportano nelle figure sottostanti i risultati dei soli modelli con 16 GCPs. Il differente numero di GCPs non comporta, a parità di ordine del polinomio, differenze sulle quote ricavate (Figura 6-49). Al contrario, il grado del polinomio, come mostrato anche per le immagini IKONOS (§5.10.3), incide sul modello finale: con il primo grado si percepisce una leggera rotazione rispetto al polinomio di grado zero (quote maggiori nella zona Nord-Est ed inferiore in quella Sud-Ovest), mentre ben più marcata è la differenza del polinomio di secondo grado, che sembra aver generato una superficie paragonabile ad una sella, con quote maggiori nei lati Est ed Ovest e minori a Nord e Sud (anche in questo caso con una lieve rotazione oraria). I risultati sui confronti statistici tra i residui (Tabella 6-38) confermano queste considerazioni: tra polinomio di ordine 0 ed 1 si ha un buon accordo, mentre nei confronti con il polinomio di secondo grado decresce la percentuale di punti con residui nell'intervallo ± 2 pixel, ed in particolare decresce fin quasi a dimezzarsi il numero di punti con residui compresi tra ± 0.25 m. Si può quindi scartare il modello ottenuto con polinomio di grado maggiore, e per i restanti valgono le conclusioni espresse per i modelli ottenuti con metodo rigoroso, per cui il processo di image

matching introduce una forte componente rumorosa nell'identificazione dei valori di quota del terreno.

GCPs	Modello 1	Modello 2	$-0.25m \leq \Delta \leq 0.25m$ [%]	$-0.50m \leq \Delta < -0.25m$ $0.25m < \Delta \leq 0.50m$ [%]	$-1.00m \leq \Delta < -0.50m$ $0.50m < \Delta \leq 1.00m$ [%]	$-1m \leq \Delta$ $\Delta \leq 1m$ [%]
40	ordine 0	ordine 1	48	21	16	85
	ordine 0	ordine 2	30	21	26	76
	ordine 1	ordine 2	30	21	26	77
16 dist.1	ordine 0	ordine 1	47	21	17	85
	ordine 0	ordine 2	25	20	27	72
	ordine 1	ordine 2	25	20	28	74
/	40 GCPs ord.1	16 GCPs dist.1, ord.1	50	20	15	85

Tabella 6-38 - GeoEye-1: residui tra i modelli ottenuti con orientamento RFM estratti ed editati con OrthoEngine v.10.3

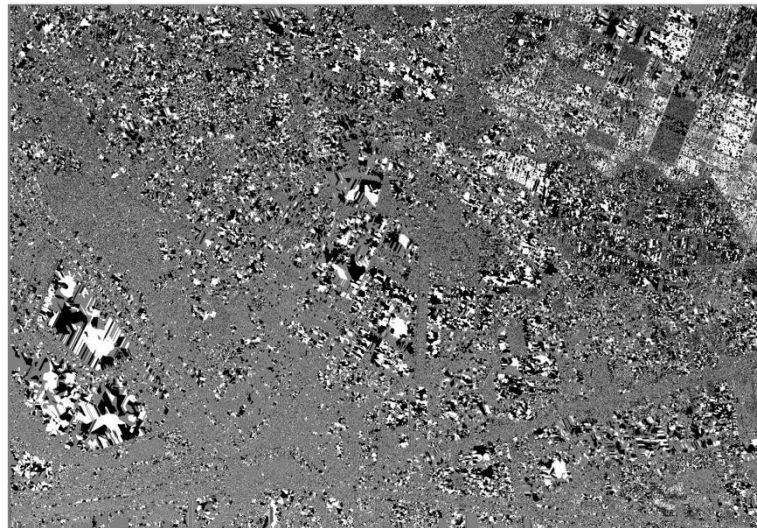


Figura 6-49 - Geoeye-1: differenza DSM 40 GCPs ordine 1 - DSM 16 GCPs distribuzione 1- ordine 1

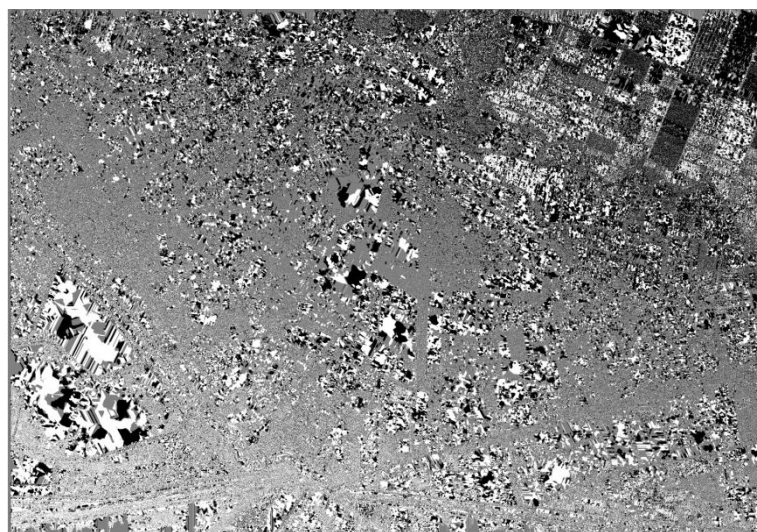


Figura 6-50 - Geoeye-1: differenza DSM 16 GCPs distribuzione 1: ordine 0 - ordine 1

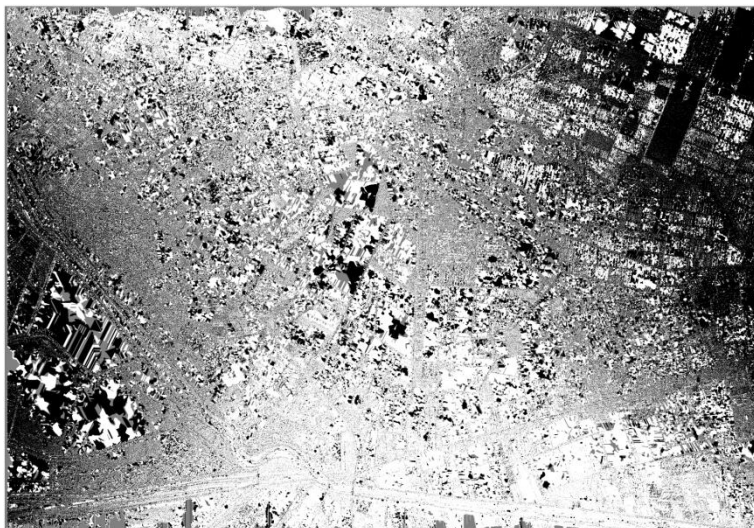


Figura 6-51 - Geoeye-1: differenza DSM 16 GCPs distribuzione 1: ordine 0 - ordine 2

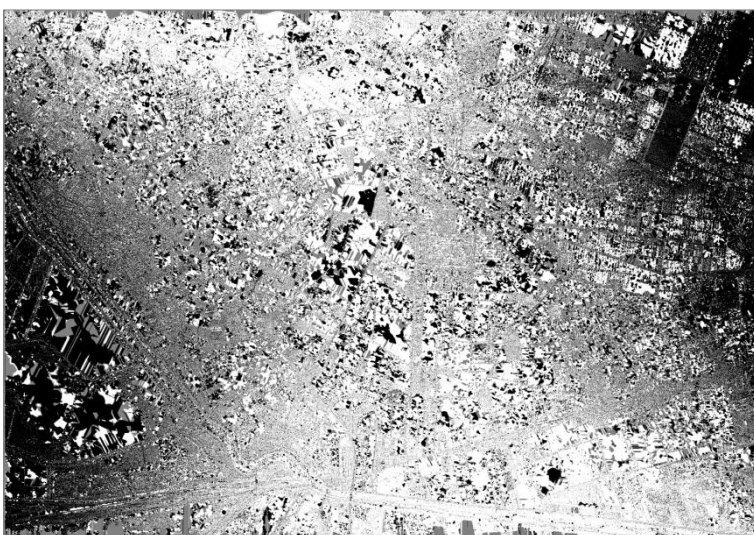


Figura 6-52 - Geoeye-1: differenza DSM 16 GCPs distribuzione 1: ordine 1 - ordine 2

6.6.5. Estrazione di profili

Come per la stereocoppia di Ferrara (§5.10.4), sono stati estratti differenti profili (Figura 6-53), due in ognuno dei tre tiles impiegati per i test con SISAR (uno orizzontale ed uno verticale), tutti di 650m.

I profili sono stati estratti per i modelli derivati sia da OrthoEngine (orientamento con modello rigoroso e RFM) che da SISAR. Nel complesso, sono stati ottenuti risultati comparabili sia per il modello rigoroso che per quelli polinomiali, per cui si mostrano solamente i grafici relativi ai primi.

Per quanto riguarda i modelli estratti con OrthoEngine, le differenze eseguite sono state:

- per ogni modello, differenze tra i DSM estratti a passo 1, 2, 4px;
- per ogni passo di estrazione, differenze tra i modelli editati con le differenti procedure di fill dei No data;
- per i modelli a passo 2px, confronto tra le differenti distribuzioni dei GCPs.

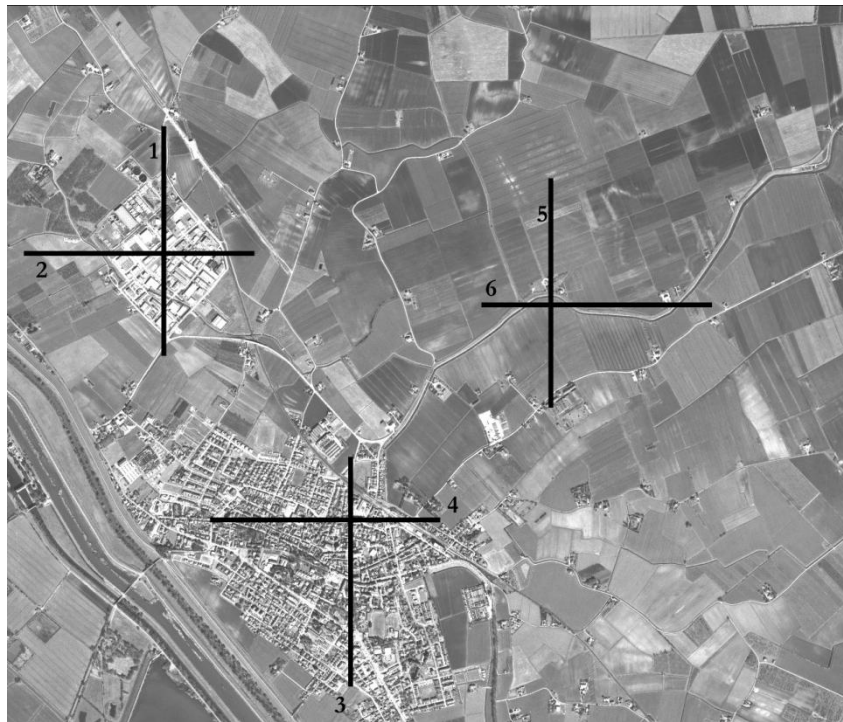


Figura 6-53 - GeoEye-1: posizione dei profili estratti

I residui medi sono risultati di pochi centimetri, con differenze massime di qualche metro (sono comunque presenti outliers con picchi di oltre 20m) e deviazioni standard variabili (valori inferiori al metro ma con picchi fino a $\pm 3\text{m}$) in funzione del tipo di editing impiegato, della risoluzione del modello e della distribuzione dei GCPs: rispetto ai risultati ottenuti con la stereocoppia IKONOS II (§5.10.4) si ha un comportamento più omogeneo tra i residui al variare della risoluzione, in quanto anche con un passo di 1px il rumore risulta più contenuto, anche se si è notato un comportamento in certi casi molto variabile in funzione della dimensione del pixel (con variazioni di quota superiori al metro, Figura 6-54).

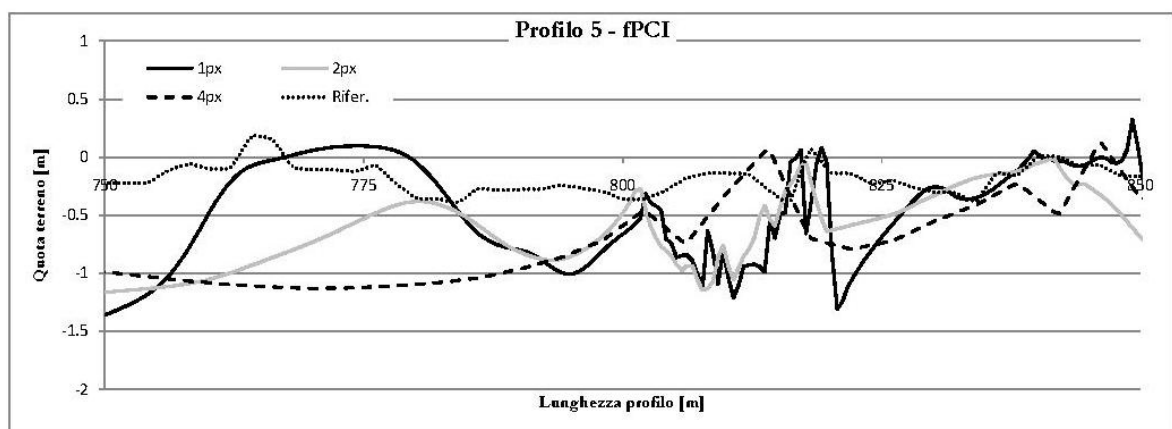


Figura 6-54 - GeoEye-1: confronti tra i profili estratti per lo stesso modello al variare del passo della griglia

Per quanto riguarda le procedure di editing, i risultati sono inficiati dall'eccessivo rumore presente nei modelli estratti da OrthoEngine; si è riscontrato in generale una maggior variazione delle quote nella procedura implementata in ArcMap con modelli a passo 1px, in quanto la media calcolata è maggiormente influenzata dalla dimensione ridotta delle singole lacune. Anche i modelli con diversa distribuzione dei GCPs mostrano andamenti analoghi, con picchi d'errore positivo e negativo derivanti dai problemi di matching.

In nessuna prova, comunque, è stato trovato un sistematismo: non si sono avuti né bias evidenti né particolari problemi in funzione della copertura del suolo, ma tutti i profili dei residui nei grafici creati hanno un andamento casuale (indipendente dalla risoluzione del modello, dalla procedura di editing, dalla zona indagata).

L'analisi sui tiles estratti con SISAR mostra nel complesso un andamento più regolare dei profili, in cui sono meno evidenti picchi e variazioni di quota in terreni omogenei (a dimostrazione di un matching più stabile).

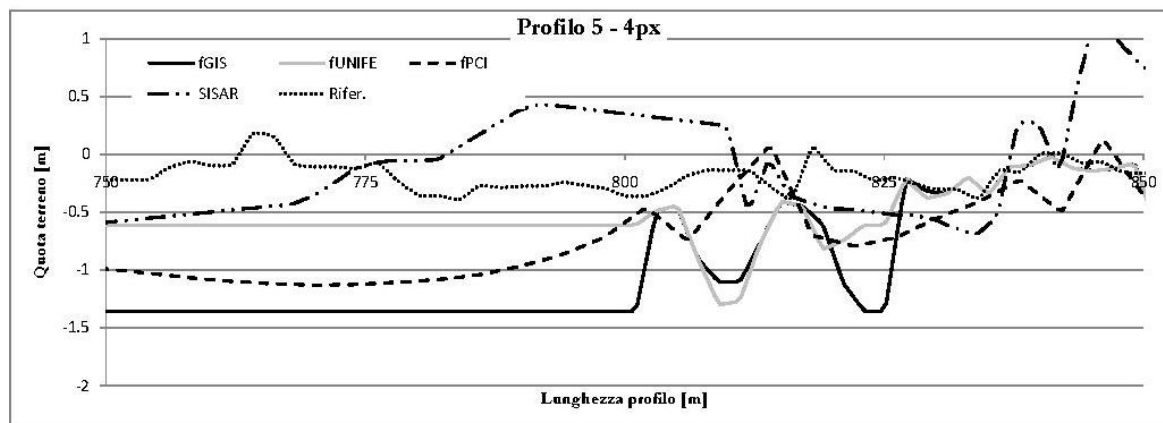


Figura 6-55 - GeoEye-1: confronti tra i profili estratti per lo stesso passo di griglia con le diverse procedure di editing del modello estratto con OrthoEngine v.10.3 e con SISAR

6.7. Impiego dei DSM estratti in campo idraulico

Come accennato in precedenza (§3.6), le moderne analisi consentono di impiegare modelli digitali del terreno nell'implementazione di complessi modelli previsionali, quali ad esempio quelli per il deflusso delle acque in seguito ad esondazioni fluviali o forti precipitazioni. Ovviamente il dato in ingresso deve essere molto accurato, e le specifiche tecniche [13] prevedono l'impiego di DSM almeno di livello 5, vale a dire con tolleranze in quota di ~0.5m e passo della griglia di 2m (Appendice II).

Nessuno dei modelli estratti con le prove descritte garantisce tale precisione in quota, come si è visto principalmente a causa di errori nella fase di matching. Si è comunque tentato di eseguire una simulazione grazie alla collaborazione con il Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara, estraendo dai TIF a disposizione un grigliato regolare in ambiente ArcMap. La simulazione è stata eseguita

mediante *Mike FLOOD* della DHI (Danish Hydraulic Institute), pacchetto software ingegneristico professionale di simulazione di correnti a pelo libero con schema bidimensionale, applicabile indistintamente in ambienti fluviali e marini (è dunque possibile impiegarlo nel caso di studi su fiumi, laghi, estuari, baie, aree costiere e mari). Il software necessita, come dati di input, di un modello digitale dettagliato del terreno e di un'onda di portata derivante dalla crisi arginale localizzata planimetricamente sulla base di considerazioni morfologiche e territoriali.

Poiché l'analisi deve essere eseguita con mesh di rappresentazione create all'interno del software stesso derivanti da modelli TIN o grid che soddisfino determinate condizioni, si riportano nei paragrafi successivi le caratteristiche dei dati e dei modelli a disposizione degli operatori del Consorzio.

6.7.1. Rilievo ed elaborazione dei dati

L'area in esame ha un'estensione totale di circa 9700 ettari (Figura 6-4a); i dati a disposizione per la generazione del TIN sono di origine diversa:

- circa 5700 ettari sono derivanti da rilievo GNSS eseguito con strumentazione GPS geodetica a doppia frequenza TOPCON Hyper-Pro in modalità stop&go e cinematica (con il ricevitore rover collegato rigidamente ad un automezzo o montato su asta per rilievi a piedi e la stazione master posta su un vertice del Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara di coordinate note). L'acquisizione, protrattasi per circa 5 mesi, è avvenuta ogni 20m durante il movimento del veicolo ad una velocità di 40÷50Km/h, oppure ogni 60 passi per spostamenti a piedi lungo gli appezzamenti; quest'ultima modalità è stata necessaria nei casi in cui si era impossibilitati a passare con l'automezzo o per descrivere in modo più accurato eventuali irregolarità dei singoli appezzamenti e dei rilevati, considerando tali tutti gli elementi con un dislivello maggiore di 0.5m su almeno uno dei due lati del rilevato stesso (in totale sono stati acquisiti circa 8400 punti terreno e percorsi circa 63Km per un totale di 12800 punti sui rilevati). Le coordinate ellissoidiche sono state poi convertite con VERTO3 in ED50-UTM32* (sistema cartografico adottato nella cartografia regionale). Il passaggio da quote ellissoidiche a quote ortometriche è stato effettuato sulla base di un modello di ondulazione geoidica che adatta localmente le quote al riferimento altimetrico regionale costituito dalla rete ARPA Emilia-Romagna per il controllo della subsidenza.
- circa 2600 ettari sono stati forniti dalla Provincia di Ravenna e derivano dall'aggiornamento del modello digitale del terreno sulla base delle informazioni CTR 1:5000 e dei rilievi svolti da Comuni, Consorzi e servizi tecnici tra il 2007 ed il 2009. Anche in questo caso le quote sono state corrette sulla base delle mappe ARPA relative allo studio sulla stima della velocità di subsidenza (variazioni nell'intervallo 0.1÷0.2m).

- circa 1100 ettari sono derivanti dalla CTR 1:5000 della Provincia di Ferrara, sempre con correzione delle quote per tenere in considerazione il fenomeno della subsidenza (variazioni di $0.13\pm 0.2\text{m}$).

Primo controllo è stata la ricerca di outliers tra i punti GNSS, eseguita confrontando sia quote di punti adiacenti che estraendo un primo TIN (analizzando poi le brusche variazioni di quota sfruttando la scala cromatica del modello). Un ulteriore controllo è stato il confronto con le quote CTR, che ha messo in luce le numerose modifiche apportate al terreno (in particolare dovute a spianamenti delle aree coltivate).

Inoltre, poiché l'obiettivo era la creazione di un modello del terreno, per i punti estratti da cartografia (in totale circa 14000) è stato necessario rimuovere tutti punti non appartenenti al piano campagna.

Per consentire una corretta elaborazione anche delle aree di bordo, è infine stato necessario creare un buffer dell'area di studio con circa altri 5000 punti estratti sempre da cartografia ed opportunamente corretti in quota.

È stato quindi possibile estrarre con ArcMap il TIN definitivo dal quale, per un'implementazione più immediata nel software di modellazione idraulica, è stato derivato un GRID (al momento non interessa il fatto che in prossimità di rilevati e canali le informazioni in quota siano mediate, poiché tali elementi verranno modellati in una fase successiva).

Per ulteriori simulazioni ed analisi costi/benefici relative alla generazione del modello è stato inoltre necessario riconoscere anche per l'area interessata dal rilievo GPS i relativi punti presenti sulla CTR, generando poi un modello con sola informazione di origine cartografica.

6.7.2. Implementazione del modello

La creazione della mesh utile per la simulazione avviene distinguendo la fase di generazione planimetrica dei triangoli e l'attribuzione delle informazioni di quota.

Per quanto riguarda la definizione della planimetria gli step necessari sono:

- definizione del dominio di calcolo, in particolare dei confini dell'area in esame, mediante entità lineari chiuse (archi) per i quali deve essere indicata la posizione planimetrica dei vertici costituenti ed il tipo di legame tra di essi (punti intermedi od estremi). Tali bordi risultano elementi invalicabili dall'acqua (non è pertanto possibile eliminare l'acqua di allagamento che oltrepasserebbe tali bordi, che fungono quindi da muro verticale di altezza infinita).
- settaggio dei parametri di generazione del modello: massima area degli elementi (10000m^2), minimo angolo ammissibile (26°) e massimo numero di vertici dei triangoli (100000) (alla fine di tale step è già possibile estrarre una prima mesh del tutto priva di informazioni di quota, caratterizzata con i dati impostati da triangoli con lati di $100\pm 150\text{m}$).
- introduzione dei rilevati come entità lineari aperte mediante l'identificazione almeno del ciglio.

- riduzione dei triangoli generati (in numero eccessivo a causa della ridotta larghezza dei rilevati, che vincola le dimensioni dei triangoli ad essi più prossimi) mediante la creazione di mesh quadrangolari e limitazione delle dimensioni dei triangoli di raccordo tra rilevati e terreno (in maniera da modellare nel modo più corretto possibile le scarpate) (lunghezza massima dei lati 25m).
- eventuale smoothing dei raccordi creati (discontinuità di angoli ed aree) per appianare alcuni difetti nella mesh generata.
- interruzione dei rilevati introdotti per consentire l'inserimento dei varchi (nota la loro posizione sulla base della conoscenza del territorio e mediante sopralluoghi e rilievi).

La definizione dell'altimetria avviene invece mediante l'inserimento di scatter data, punti di quota nota che non modificano planimetricamente la mesh generata (pur non coincidendo con i suoi nodi) ma che permettono al software di eseguire un'interpolazione del valore di quota da attribuire ai vertici dei triangoli generati (per diminuire l'effetto dell'interpolazione è quindi necessario raffittire i punti nelle aree di maggior interesse). I punti di quota nota inseriti sono relativi a:

- punti terreno: derivano dal GRID generato in ArcMap. A causa dell'estensione dell'area studiata e di conseguenza dell'elevato numero di triangoli generati, il passo è stato progressivamente ridotto fino a 50x50m. È stato inoltre necessario eliminare anche tutti i punti posizionati all'interno dei poligoni dei rilevati (in quanto come detto il modello generato in ambiente GIS contiene esclusivamente informazioni di quota relative al terreno).
- punti sui cigli dei rilevati: si è introdotto un punto ogni 2.5m ricavando la quota dal rilievo cinematico eseguito.
- punti ai piedi dei rilevati: necessari per garantire una corretta modellazione delle scarpate, sono stati inseriti con interdistanza di 10m. Identificato il tracciato planimetrico (ricalcando CTR od immagini satellitari o mediante un buffer dei cigli), la quota è stata calcolata in ArcMap proiettando ogni polilinea sul modello generato.
- punti adiacenti ai varchi: è necessario attribuire valori di quota minori od al più coincidenti a quelli di scorrimento del varco stesso, con valori derivati nel caso in esame dai rilievi GPS eseguiti.

Inseriti tutti i valori necessari, con il natural neighbour è stata eseguita l'interpolazione. La validità di tale procedura è stata testata confrontando il file delle quote degli scatter points con quelli corrispondenti generati nella mesh, osservando variazioni al massimo di 0.1m (localizzate in prossimità dei rilevati). Si è ovviamente osservato che, maggiore è la densità dei punti di input, migliore è la definizione dei rilevati e del terreno: l'unico limite è dunque l'onere computazionale derivante dall'incremento delle informazioni in ingresso. I differenti passi dei set di dati descritti in precedenza sono risultati ottimali in relazione a tempi di elaborazione ed approssimazione introdotta.

Per permettere l'analisi costi/benefici sono stati in realtà implementati 3 modelli:

- modello con informazioni terreno derivanti dalla sola CTR e senza l'inserimento dei rilevati;
- modello con informazioni terreno derivanti dalla sola CTR con l'inserimento dei rilevati;
- modello con informazioni terreno derivanti dal rilievo GPS e dalla CTR e con l'inserimento dei rilevati.

Da ultimo, tre ulteriori modelli sono stati generati inserendo anche la rete dei canali di bonifica (noti il tracciato planimetrico e la geometria delle sezioni trasversali) in modo da eseguire simulazioni che considerino sia il movimento bidimensionale dell'acqua sul terreno (conseguente alla crisi arginale) che lo stato di moto monodimensionale nei canali.

6.7.3. Definizione dell'evento critico

Per non appesantire la trattazione, si riportano solamente le principali conclusioni delle complesse analisi condotte dai tecnici del Consorzio. Esse sono basate su tutte le serie temporali di livello dell'ultimo trentennio relativi alle stazioni presenti lungo il tratto vallivo del fiume e dei suoi quattro affluenti di valle. È stato così possibile identificare il valore di portata al colmo da cui dedurre idrogrammi utili per la definizione delle condizioni al contorno impiegabili nella modellazione idrodinamica, finalizzata alla ricerca della condizione più favorevole allo sviluppo della crisi arginale (formazione di elevati tiranti all'interno dell'asta fluviale). Ciò ha permesso di ipotizzare la posizione delle possibili breccie (in tutto tre) sulla base dell'analisi dello spessore arginale e dell'andamento della sommità, stabilendo che la crisi può avvenire solamente per sifonamento; tali informazioni sono state quindi implementate sempre nel software per la simulazione, in cui sono state valutate le onde di breccia e ricostruito il processo di formazione della breccia stessa a partire dai dati sulla sezione arginale, sul terreno che lo costituisce e sull'istante di innesco del sifonamento (raggiungimento nel corso d'acqua del 95% del livello massimo di piena, in fase crescente).

6.7.4. Simulazione e validazione

La costruzione delle mappe di allagamento è avvenuta con simulazioni protrattesi fino alla 144^o ora dall'innesco della breccia, con tempi di elaborazione variabili fra 1÷2 settimane per ciascuna prova condotta. Per consentire una restituzione grafica ed un confronto i risultati sono stati nuovamente riportati ad una griglia di passo 50m; ciò ha permesso la creazione di mappe di sintesi in prevalenza relative alla fase di espansione dell'allagamento (massima profondità, fasce di profondità, pericolosità idraulica).

Al termine di ciascuna simulazione è stato possibile valutare gli effetti indotti dall'allagamento, con particolare riferimento alle opere del Consorzio (e relative vie d'accesso e fonti di alimentazione elettrica) ed alla loro capacità di far fronte al prosciugamento delle aree alluvionate dopo l'evento (è infatti necessario un sollevamento meccanico ad una quota tale da permettere il trasporto verso mare). Di pari importanza è stata la mole di informazioni utili alla predisposizione di piani di emergenza di protezione civile (progressivo allagamento dei punti critici e delle vie di accesso) e per una corretta pianificazione territoriale (nuove infrastrutture e zone di possibile espansione urbana).

Tali simulazioni sono state inoltre condotte confrontando i modelli realizzati a partire dalle diverse informazioni topografiche e con presenza o meno di rilevati e rete dei canali, in maniera da valutare i diversi gradi di precisione raggiungibili, valutati come differenza in termini di estensione degli allagamenti. Assunto come modello di riferimento quello con informazioni derivanti da rilievo GPS e CTR e con presenza dei rilevati e dei canali, si è riscontrato che, in ordine di importanza sulla precisione dei risultati, gli elementi da considerare risultano:

- rilevati: la loro assenza comporta risultati fuorvianti ed imprecisi sia per quanto riguarda l'estensione delle aree allagate che la dinamica temporale dei fronti e delle altezze idriche.
- rete dei canali: influenza sia la dinamica di avanzamento del fronte di allagamento che il processo di prosciugamento al termine dell'evento critico.
- precisione dei dati altimetrici del terreno: a causa del carattere fortemente pianeggiante, l'effetto è smorzato dalla presenza di tutti gli ostacoli lineari (rilevati e canali).

6.7.5. Impiego di dati satellitari

Il test è stato condotto impiegando il modello pancromatico a passo 4px generato con OrthoEngine, in quanto unico software al momento in grado di mettere a disposizione dati in un'area sufficientemente estesa; per eliminare gli outliers e punti problematici nelle aree edificate, il grigliato estratto è stato opportunamente filtrato, dopodiché è stato implementato nel software idraulico con le modalità descritte ai paragrafi precedenti.

Una prima prova è stata condotta tralasciando l'inserimento dei rilevati, ma la simulazione dell'evento ha mostrato eccessive discrepanze con le elaborazioni di riferimento, in quanto la capacità di identificare correttamente tutti i rilevati è risultata insufficiente. Risultati migliori sono invece stati ottenuti inserendo argini, strade e canali derivanti dai rilievi diretti, anche se al momento essi non sono stati ritenuti soddisfacenti.

Conclusioni

La disponibilità sempre maggiore di piattaforme in grado di acquisire immagini con risoluzioni superiori al metro offre oggi un'alternativa vantaggiosa sotto diversi punti di vista ai classici voli aerofotogrammetrici. Ciò sta avendo un impatto sempre più rilevante su tutte le principali applicazioni cartografiche: aggiornamenti di cartografia esistente, generazione di ortofoto, estrazione di Modelli Digitali del Terreno o della Superficie, estrazione di oggetti e city modeling.

In questa tesi l'attenzione è stata posta sull'estrazione di Modelli Digitali della Superficie a partire da stereocoppie ad alta risoluzione acquisite in modalità in-track e sull'accuratezza da essi raggiungibile, al fine di impiegare questi modelli all'interno di complesse simulazioni idrauliche nell'analisi di territori soggetti a rischio idraulico. Di conseguenza, le informazioni in quota contenute nel modello devono avere un'accuratezza maggiore di 0.5m, ed altrettanto elevata deve risultare la sua capacità di descrivere la morfologia dell'area in esame.

Si è pertanto analizzato l'intero processo di generazione, confrontando tra loro diversi programmi ed eseguendo prove sia con una stereocoppia IKONOS II dell'area di Ferrara (risoluzione pari ad 1m per le immagini pancromatiche) che una GeoEye-1 della zona di Argenta (FE) (risoluzione di 0.5m).

La fase di orientamento delle immagini grezze è eseguibile mediante due tipi di modelli, quelli fisici rigorosi e quelli matematici generalizzati. Sono stati testati il software commerciale Orthoengine della PCI Geomatics ed il software scientifico SISAR (Software per Immagini Satellitari ad Alta Risoluzione) sviluppato presso l'Area di Geodesia e Geomatica dell'Università la Sapienza di Roma dal gruppo di lavoro del Prof. M. Crespi.

I risultati relativi ai modelli rigorosi hanno mostrato che è possibile ottenere accuratèzze sull'orientamento dell'ordine di 0.5 ± 0.8 pixel in direzione Nord ed Est e di 0.8 ± 1 pixel in direzione Up con entrambi i software, anche se SISAR si è mostrato più stabile al variare del numero e della distribuzione dei GCPs (sono risultati necessari 10 ± 20 GCPs per un'area di circa 100Km^2). È risultato fondamentale il corretto riconoscimento dei punti terreno sulle immagini, in quanto entrambi i programmi hanno mostrato un'elevata sensibilità nel caso di piccoli errori di posizionamento ($0.5\pm 0.75\text{px}$) ripetuti in maniera casuale su più punti.

Le prove condotte con SISAR con i modelli razionali hanno mostrato una sostanziale equivalenza con le precedenti, ed inoltre il raffinamento degli RPCs non ha portato a sensibili miglioramenti, a dimostrazione di una buona elaborazione del dato grezzo da parte delle aziende che gestiscono le piattaforme satellitari.

Da ultimo, l'introduzione di punti ausiliari di sole coordinate immagine note (TPs) si è dimostrata del tutto ininfluenza ai fini dei risultati ottenibili.

Le successive fasi di matching e di estrazione del modello sono state eseguite sempre con i medesimi software e, per le immagini IKONOS II, anche con il software scientifico DPCOR sviluppato presso la Leibniz University di Hannover dal gruppo di lavoro del prof. K. Jacobsen. I software scientifici sono stati esaminati in aree di estensione limitata e copertura omogenea, mentre con OrthoEngine è stato possibile anche estrarre un DSM complessivo dell'intera area acquisita.

Per quanto riguarda la stereocoppia IKONOS II sono emerse problematiche in particolare per il software commerciale sia nel riconoscimento delle aree più densamente edificate che per un eccessivo rumore con creazione di aree a quote (positive e negative) del tutto errate. Ulteriori test, condotti con le immagini multispettrali, hanno mostrato buoni risultati con i dati NIR, per cui è stata implementata in ambiente GIS una procedura per colmare le lacune e correggere le aree con eccessivo rumore unendo le informazioni estratte dai due modelli. I software scientifici hanno mostrato una minor rumorosità dei dati estratti, ma al momento la fase di regolarizzazione del modello risulta troppo approssimata poiché eseguita mediante una semplice triangolazione.

I controlli sull'accuratezza ottenuta, eseguiti sia con un congruo numero di punti GPS rilevati in modalità cinematica e stop&go con accuratezza di 0.3m, che con un modello di riferimento di passo 2m ed accuratezza in quota di circa 0.6m, hanno mostrato residui di circa 2 pixel in aree rurali, e valori doppi in aree urbane e con vegetazione ad alto fusto. Nonostante una buona discriminazione degli oggetti presenti sul territorio, i modelli generati non si sono dimostrati sufficienti per un impiego in studi di elevata precisione.

Impiegando la stereocoppia GeoEye-1 sono emerse difficoltà di matching a causa di texture troppo omogenee nei campi, in maggioranza con suolo nudo o piante giovani poiché l'acquisizione è avvenuta a fine inverno. Per rimediare a tale inconveniente, maggiormente visibile nei modelli estratti con OrthoEngine, si è quindi resa necessaria una fase di editing con il programma stesso od in ambiente GIS.

La validazione, effettuata con le stesse modalità anche per questa stereocoppia, ha fornito residui di circa 1.5 pixel nelle aree rurali e di poco inferiori a 4 pixel in quelle urbane. In termini di pixel i valori rimangono dunque simili alle immagini IKONOS II, mostrando un limite per l'accuratezza dei modelli derivabili da immagini satellitari; il vantaggio è dato in questo caso dalla risoluzione spaziale delle immagini GeoEye-1, pari alla metà.

In accordo con le specifiche tecniche CISIS per i modelli altimetrici, i risultati acquisiti con entrambe le stereocoppie non permettono l'impiego dei DSMs estratti nella modellazione idraulica (risultati al più corrispondenti al livello 3, mentre quello minimo è il 5). Per quanto riguarda in particolare i dati derivanti dalle immagini GeoEye-1, essi sembrano comunque incoraggianti per un impiego del grigliato nell'ambito della modellazione idraulica, seppur implementato assieme a dati derivanti da altre tecniche di misura per zone con variazioni in quota da modellare con precisioni elevate. Ciò è stato dimostrato anche da simulazioni condotte dai tecnici del Consorzio di Bonifica

Pianura di Ferrara eseguite nella stessa area: in terreni fortemente pianeggianti come quelli indagati, al fine di una corretta modellazione dell'estensione degli allagamenti, il corretto inserimento nel modello di rilevati e rete dei canali risulta assai più importante dell'informazione in quota delle aree interne alle celle idrauliche.

Mediante l'impiego di software scientifici, quindi, sarà possibile ottenere un affinamento delle procedure e dei parametri di matching al fine di garantire anche con immagini con risoluzione spaziale di 0.5m risultati sufficienti alle finalità prefissate; ciò deve però essere sempre associato ad un attento editing dei dati estratti e ad una corretta interpolazione degli stessi. Al contrario, poiché tutte queste operazioni sono solitamente precluse all'operatore nella maggior parte dei software commerciali, in questo caso le applicazioni dei modelli estratti dovranno essere ridotte ad ambiti in cui è richiesta una minor accuratezza.

Ringraziamenti

Ringrazio sentitamente il Prof. Paolo Russo per avermi dato la possibilità di frequentare questa Scuola di Dottorato e per tutti i consigli e gli spunti di riflessione ed approfondimento offerti costantemente durante tutto il triennio.

Ringrazio anche il Prof. Alberto Pellegrinelli per il supporto ed i preziosi consigli e suggerimenti durante tutto il lavoro di tesi.

Un sentito grazie va anche al Prof. Mattia Crespi dell'Università di Roma "La Sapienza" ed a tutto il suo gruppo di lavoro per la splendida accoglienza e collaborazione offertami non solo nei mesi trascorsi con loro.

Infine, un grazie anche a tesisti e borsisti con cui ho condiviso le giornate di rilievo e le lunghe elaborazioni in laboratorio.

Bibliografia

- [1] Baiocchi V., Calcagni L., De Vendictis L., Crespi M., Iannucci G. (2004), “Estrazione di DEM da stereo coppie IKONOS: metodologia, problemi e valutazione della qualità dei prodotti”. *Atti della 8° Conferenza Nazionale ASITA*, Roma 14-17/12/2004.
- [2] Baiocchi V., Crespi M., De Vendictis L., Giannone F. (2004), “Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione per scopi metrici”, *Atti della 8° Conferenza Nazionale ASITA*, Roma 14-17/12/2004.
- [3] Baiocchi V., Crespi M., De Vendictis L., Mazzoni A., Salerni A. (2005), “DSM estratti da stereocoppie IKONOS ed EROS A: accuratezza media e sua dipendenza dalla morfologia e dalla copertura del suolo”. *Atti della 9° Conferenza Nazionale ASITA*, Catania 15-18/11/2005.
- [4] Baltsavias E., Pateraki M., Zhang L. (2001), “Radiometric and geometric evaluation of IKONOS geo images and their use for 3D building modeling”. *Atti del Joint ISPRS Workshop on High Resolution Mapping from Space*, Hannover 19-21/09/2001.
- [5] Baltsavias E., Li Z., Eisenbeiss H. (2006), “DSM generation and interior orientation determination of IKONOS images using a testfield in Switzerland”. articolo scaricabile sul sito <http://www.photogrammetry.ethz.ch>.
- [6] Botti G. (2009), “DEM generation from high-resolution satellite images”. *Tesi di Laurea Specialistica*, Università degli Studi di Ferrara - Facoltà di Ingegneria.
- [7] Borgogno Mondino E., Giulio Toniolo F., Rinaudo F. (2003), “Calibrazione di immagini satellitari ad alta risoluzione. Il metodo dei rapporti polinomiali”. *Atti della 7° Conferenza Nazionale ASITA*, Verona 28-31/10/2003.
- [8] Brovelli M.A., Caldera S., Liu X., Sansò F. (2009). “Valutazione dell’accuratezza tridimensionale di un modello digitale del terreno”. *Atti del Convegno Nazionale SIFET*, Mantova 24-27/06/2009.
- [9] Brovelli M.A., Crespi M., Fratarcangeli F., Giannone F., Realini E. (2008), “Accuracy assessment of high resolution satellite imagery orientation by leave-one-out method”. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 63(2008): 427-440.
- [10] Burrough P.A., Mc Donnel R.A. (1998), “Principles of geographical information system”. *Oxford University Press*, Oxford.
- [11] Capaldo P., Crespi M., De Vendictis L., Fratarcangeli F., Murchio G., Nascetti A., Pieralice F. (2010), “Geometric potentiality of GeoEye-1 in-track stereo pairs and accuracy

- assessment of generated Digital Surface Models”. *Atti del XXX EARSeL Symposium*, Parigi, 31/5-3/6/2010.
- [12] Cheng P., Toutin T. (2001), “Orthorectification and DEM generation from high resolution satellite data”. *Atti del 22nd Asian Conference on Remote Sensing*, Singapore 5-9/11/2001.
- [13] Cilloccu F., Dequal S., Brovelli M., Crespi M., Lingua A. (2008), “Ortoimmagini 10K e modelli altimetrici - Specifiche tecniche”. CISIS.
- [14] Crespi M., Colosimo G., Fratarcangeli F., Jacobsen K., Pieralice F. (2009), “Valutazione dell’accuratezza del DSM estratto da una stereo coppia WorldView-1”. *Atti della 13^o Conferenza Nazionale ASITA*, Bari 1-4/12/2009, pp. 815-820.
- [15] Crespi M., Fratarcangeli F., Giannone F., Pieralice F. (2007), “Orientamento di immagini satellitari IKONOS: implementazione di un modello originale nel software scientifico SISAR”. *Atti della 11^o Conferenza Nazionale ASITA*, Torino 6-9/11/2007, pp. 815-820.
- [16] Dial G., Bowen H., Gerlach F., Grodecki J., Oleszczuk R. (2003), “IKONOS satellite, imagery, and products”. *Remote Sensing of Environment*, 88(2003): 23-36.
- [17] Fraser C.S., Hanley H.B. (2003), “Bias compensation in rational functions for IKONOS satellite imagery”. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(1): 53-57.
- [18] Fraser C.S., Baltsavias E., Gruen A. (2002), “Processing of Ikonos imagery for submetre 3D positioning and building extraction”. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 56(2002): 177- 194.
- [19] Fratarcangeli F. (2010), “Orientation models of optical High Resolution Satellite Imagery: definition, implementation, and validation of original algorithms”. *Tesi di Dottorato, supervisore Prof. M. Crespi*, Università di Roma “La Sapienza”, Facoltà di Ingegneria - DITS Area Geodesia e Geomatica.
- [20] Gabaldo M. (2010), “Modello tridimensionale della superficie da stereocoppia satellitare ad alta risoluzione: test e verifiche di precisione”. *Tesi di Laurea Specialistica*, Università degli Studi di Ferrara - Facoltà di Ingegneria.
- [21] Galletto R. (2004), “Camere digitali per riprese aeree e terrestri”, *Bollettino SIFET*, 2004-4: 45-85.
- [22] GeoEye IKONOS Imagery Products Guide, (2006).
- [23] Giannone F. (2006), “A rigorous model for High Resolution Satellite Imagery Orientation”. *Tesi di Dottorato, supervisore Prof. M. Crespi*, Università di Roma “La Sapienza”, Facoltà di Ingegneria - DITS Area Geodesia e Geomatica.

-
- [24] Grodecki J. (1999), "Ground control specification", Space Imaging Inc.
- [25] Grodecki J., Dial G. (2001), "IKONOS geometric accuracy". *Atti del Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/2, I/5 and IV/7 on High Resolution Mapping from Space*, University of Hannover.
- [26] Grodecki, J., Dial G. (2003), "Block adjustment of high resolution satellite images described by rational functions". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(1): 59-68.
- [27] Hanley H.B., Fraser C.S. (2004), "Sensor orientation for high-resolution satellite imagery: further insights into bias-compensated RPC". *Atti del XX ISPRS Congress*, Istanbul 12-23/07/2004.
- [28] Hijazi J., "Elevation extraction from satellite data using PCI software". scaricabile sul sito <http://www.pcigeomatics.com>.
- [29] Hu Y., Tao C.V. (2001), "Updating solutions of the rational function model using additional control points for enhanced photogrammetric processing". *Atti del Joint ISPRS Workshop on High Resolution Mapping from Space*, Hannover 19-21/09/2001, pp. 243-251.
- [30] Jacobsen K., "High resolution satellite imaging systems - overview". scaricabile sul sito <http://www.ipi.uni-hannover.de>.
- [31] Jacobsen K. (2002), "Mapping with IKONOS images". *Atti del XXII EARSeL Symposium*, Praga, 4-6/06/2002.
- [32] Jacobsen K. (2003a), "DEM generation from satellite data". *Atti del XXIII EARSeL Symposium*, Ghent, 2-5/06/2003.
- [33] Jacobsen K. (2003b), "Geometric potential of IKONOS and QuickBird images". *Photogrammetric Weeks '03*, pp. 101-110.
- [34] Jacobsen K., Büyüksalih G., Topan H. (2005), "Geometric model for the orientation of high resolution optical satellite sensors". scaricabile sul sito <http://www.ipi.uni-hannover.de>.
- [35] Marat G., Bousquet M. (2003), "Satellite communications systems - fourth edition". *John Wiley & Sons LTD*.
- [36] Miller C., La Flamme R.A. (1958), "The digital terrain modelling - theory and applications". *Photogrammetric Engineering*, 24 (3): 433-442.
- [37] Mistretta S. (2009), "Le stazioni permanenti GNSS per il rilievo GPS in tempo reale". *Tesi di Laurea*, Università degli Studi di Ferrara - Facoltà di Ingegneria.

- [38] Natural Resources Canada, "Fundamentals of Remote Sensing". scaricabile sul sito <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>.
- [39] Noerdlinger P.D. (1999), "Atmospheric refraction effects in earth remote sensing". *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54(1999): 360-373.
- [40] Parente C., Santamaria R. (2008), "Applicazione di tecniche di Pan-sharpening IHS ad immagini IKONOS". *Atti della 12° Conferenza Nazionale ASITA*, L'Aquila 21-24/10/2008, pp. 1577-1582.
- [41] Pellegrinelli A., Perfetti N., Russo P. (2005), "Un'applicazione DEM da stereocoppia Ikonos". *Atti del Convegno Nazionale SIFET*, Palermo, 29/6-1/7-2005.
- [42] Petrie G., Kenzie T.J.M. (1990), "Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering". *McGraw Hill*, New York.
- [43] Pino I. (2007), "Il monitoraggio del campo di velocità del ghiaccio in Terra Vittoria (Antartide) mediante l'uso di tecniche di cross-correlazione su immagini satellitari". *Tesi di Dottorato*, Università di Bologna, DISTART.
- [44] Poli D. (2005), "Modelling of spaceborne linear array sensors". *Tesi di Dottorato*, ETH Zurigo, Nr. 15894, IGP Mitteilung, (85).
- [45] Rees W.G. (2001), "Physical principles of remote sensing - second edition". *Cambridge University Press*.
- [46] Richards J.A., Jia X. (2006), "Remote sensing digital image analysis - An introduction". *Springer*, Berlino.
- [47] Selvini A., Guzzetti F. (1999), "Cartografia generale - tematica e numerica". *UTET*, Torino.
- [48] Selvini A., Guzzetti F. (2000), "Fotogrammetria generale". *UTET*, Torino.
- [49] Tao C.V., Hu Y. (2000), "Investigation of the Rational Function Model". *Atti del ASPRS Annual Convention*, Washington D.C., 22-26/05/2000.
- [50] Tao C.V., Hu Y. (2001a), "The rational function model - A tool for processing high-resolution imagery". *Earth Observation Magazine*, 10(1):13-16.
- [51] Tao C.V., Hu Y. (2001b), "A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(12): 1347-1357.
- [52] Tao C.V., Hu Y. (2001c), "Use of the rational function model for image rectification". *Canadian Journal of Remote Sensing*, 27(6): 593-602.

-
- [53] Tao C.V., Hu, Y. (2002), "3D reconstruction methods based on the rational function model". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(7): 705-714.
- [54] Teti N., Marsella M., Volpe F. (2004), "Generazione e validazione di immagini ortorettificate tramite dati QuickBird". *Atti della 8° Conferenza Nazionale ASITA*, Roma 14-17/12/2004.
- [55] Toutin T. (2004), "DTM generation from Ikonos in-track stereo images using a 3D physical model". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(6): 695-702.
- [56] Toutin T. (2004), "Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods (review paper)". *International Journal of Remote Sensing*, 10(2004): 1893-1924.
- [57] Toutin T., Chénier R., Carbonneau Y. (2001), "3D geometric modeling of IKONOS Geo images". *Atti del ISPRS Joint Workshop High resolution mapping from space*, Hannover 19-21/09/2001.
- [58] Toutin T., Chénier R., Carbonneau Y. (2002), "3D models for high resolution images: examples with Quickbird, Ikonos and EROS". *Atti del ISPRS Commission IV Symposium, Joint International Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications*, Ottawa, 8-12/07/2002, pp. 547-551.
- [59] Westin T. (1990), "Precision rectification of SPOT imagery". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 56(2): 247-253.
- [60] Yang, X. (2000), "Accuracy of rational function approximation in photogrammetry". *Atti del ASPRS Convention*, Washington, D.C., 26/05/2000.
- [61] Zhou G., Li R. (2000), "Accuracy evaluation of ground points from IKONOS high-resolution satellite imagery". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(9): 1103-1112.

siti internet

- [62] www.esri.com
- [63] www.eurimage.com
- [64] www.geoeye.com
- [65] www.isprs.org
- [66] www.pcigeomatics.com
- [67] www.sysdeco.it

Appendici

Appendice I Caratteristiche dei satelliti impiegati

A.I.1 IKONOS II

Il satellite IKONOS II, della ditta Space Imaging, è stato lanciato il 24 Settembre 1999 dalla Vandenberg Air Force Base in California. Il suo scopo era quello di fornire, a livello mondiale, immagini ad alta risoluzione a singoli individui, organizzazioni o governi, generalmente a scopo cartografico, di monitoraggio o di ricerca.

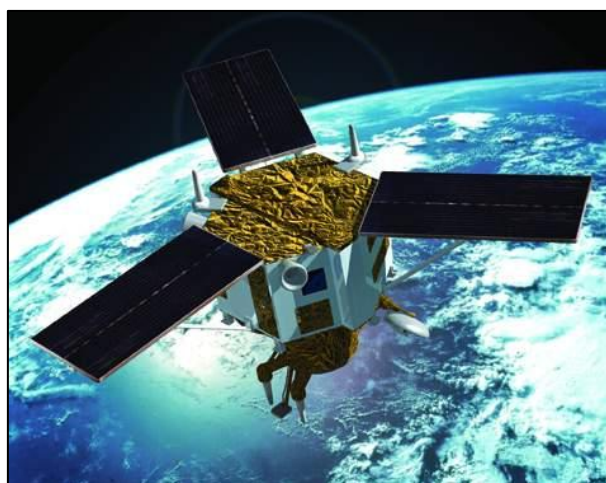


Figura A.I-1 - Satellite IKONOS II

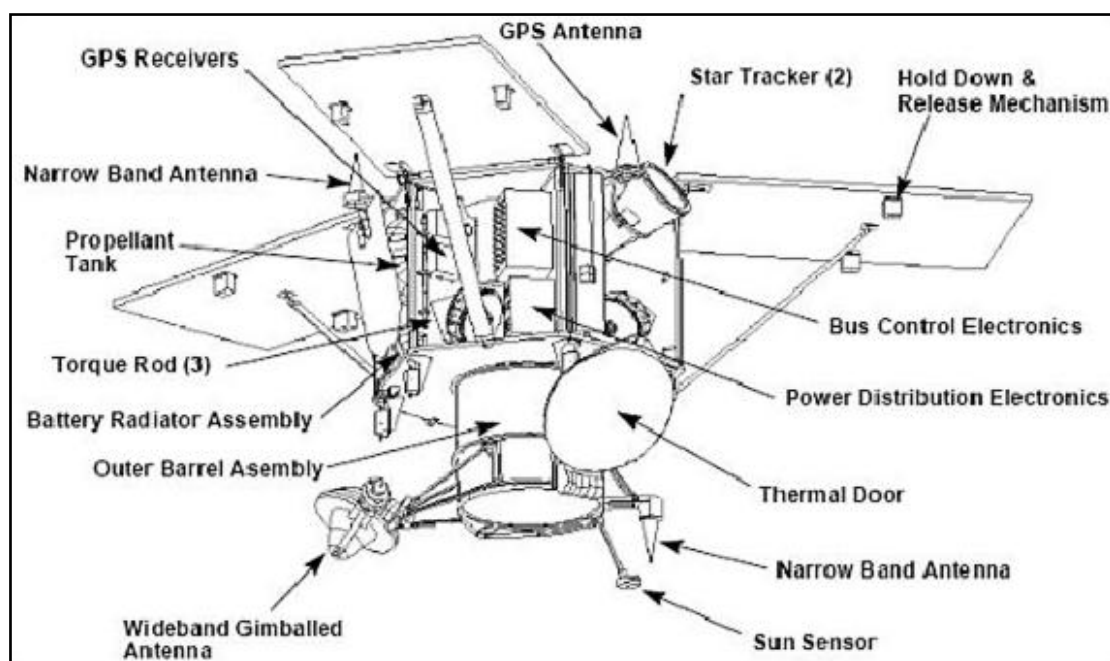


Figura A.I-2 - Componenti del satellite IKONOS II

Il satellite compie circa 15 orbite al giorno volando ad un'altitudine di 681Km ad una velocità orbitale di 7.5Km/sec; la sua orbita pseudo-polare con inclinazione di 98.1° è eliosincrona, tale da garantire il passaggio sopra ad una qualsiasi area del globo attorno alle 10:30 ora locale. Il periodo di rivisitazione è di 1.5 giorni con una risoluzione nel pancromatico maggiore di 2m e di 14 giorni per una presa nadirale; i parametri orbitali sono stati infatti scelti in modo che nelle zone di media latitudine ci sia un tempo di rivisitazione pari a:

- 1.5 giorni a 45° di inclinazione;
- 3 giorni a 26° di inclinazione;
- 11 giorni a 10° di inclinazione;
- 14 giorni a 1° di inclinazione.

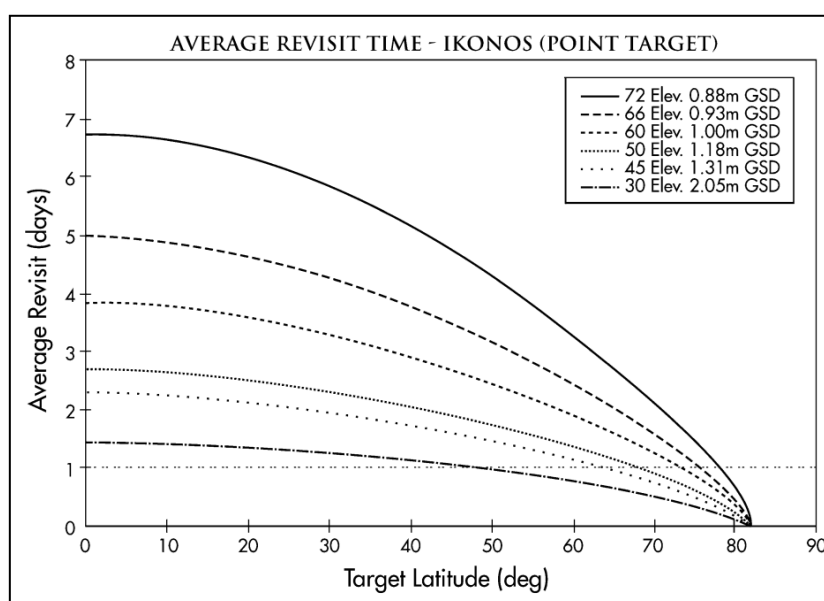


Figura A.I-3 - Relazione tra tempo di rivisitazione, latitudine GSD, elevazione ed angolo del sensore per IKONOS II [15]

Il satellite è un corpo rigido di puntamento: la camera è rigidamente montata sul satellite, e l'intero satellite ruota per acquisire l'immagine, quindi non utilizza articolazioni meccaniche, specchi per la scansione, o altre parti mobili. È possibile acquisire sia immagini pancromatiche, con una risoluzione 0.82m al nadir, che multispettrali (bande Blue, Green, Red, NIR) con un GSD di 3.28 m al nadir. È possibile anche disporre di immagini pan-sharpened, mantenendo la stessa precisione delle immagini pancromatiche.

In tutto si hanno 6 sensori installati, due per il pancromatico (uno per l'acquisizione forward l'altro per la reverse) con tecnologia TDI a 32 stages e 4 sensori multispettrali senza TDI. In particolare, i sensori TDI sono costituiti da 3 CCDs separati di circa 5000 pixel l'uno, sovrapposti per formare la linea complessiva, mantenendo il sensore centrale sfalsato rispetto agli altri due in direzione perpendicolare al piano del sensore e parzialmente sovrapposto nella direzione di sviluppo del sensore.

La possibilità di ruotare il sensore fino ad un massimo di 26°, per acquisire immagini su zone distanti dal satellite fino a 700Km, comporta il raggiungimento di valori rispettivamente di 1m e 4m (l'angolo di off nadir è solitamente inferiore a 50°). Inoltre, potendo ruotare in tutte le direzioni, è possibile dunque acquisire stereocoppie in modalità along e across track: solitamente la prima immagine è acquisita puntando in avanti il sensore, dopo poco più di un minuto si acquisisce invece la seconda immagine puntandolo all'indietro.

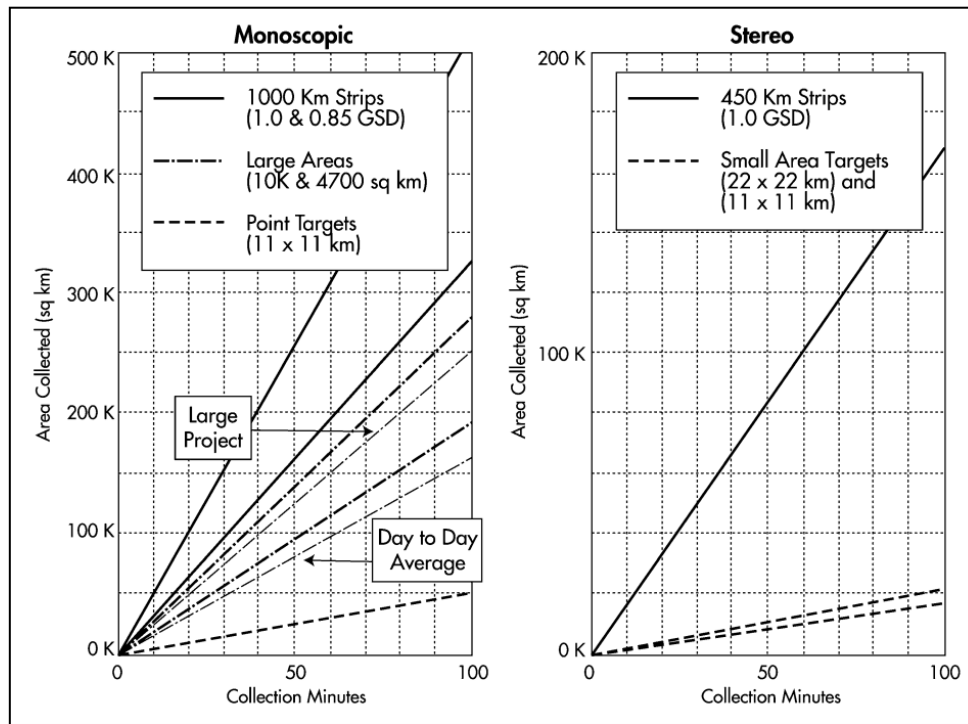


Figura A.I.4 - Grafici per le aree rilevabili in modalità monoscopica e stereoscopica [15]

Il sensore lineare permette di catturare con 1m di GSD più di 5390Km²/min in modalità strisciata. Per aree molto larghe e continue si riscontra un calo dell'efficienza (intesa come il rapporto tra l'area rilevata e tempo necessario per rilevarla) perché diventa necessario utilizzare più strisciate. L'efficienza risulta minima quando è richiesta la raccolta di puntuale di piccole aree sparse di diverse zone e occorre perciò diverso tempo di manovra per collezionare le diverse immagini. Per aree di elevata dimensione l'acquisizione avviene inoltre solitamente in due momenti: la prima strisciata in modalità standard, la successiva ruotando il sensore lateralmente ed acquisendo in direzione opposta al movimento del satellite ruotando continuamente l'intera piattaforma; nuovamente, la terza strisciata viene realizzata in modalità standard.

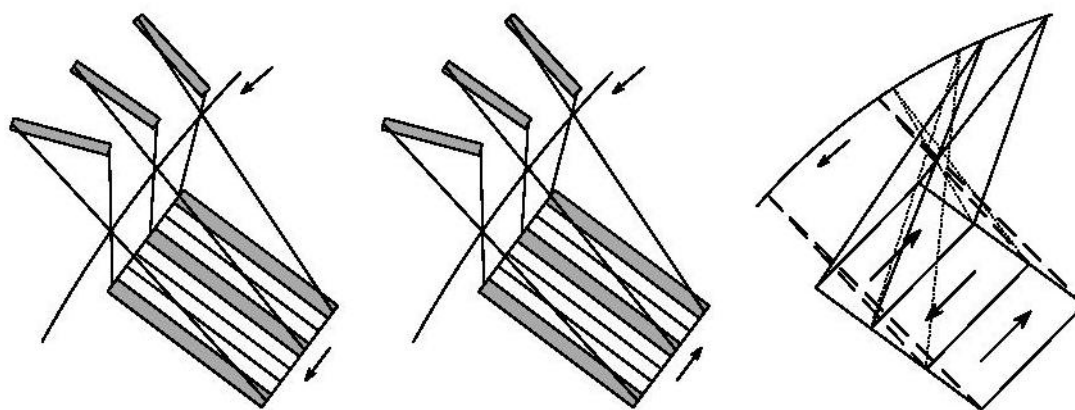


Figura A.I-5 - Principio di acquisizione delle immagini IKONOS II

L'installazione a bordo di una memoria da 64GB consente la memorizzazione fino ad un massimo di 26 immagini (sia pancromatiche che multispettrali) di cui si esegue il download dalle stazioni di ricezione a terra.

Il sistema GPS installato a bordo della piattaforma permette di ottenere le effemeridi, che vengono poi post-processate a terra con un software che incorpora un sofisticato filtro per gli algoritmi dei modelli orbitali.

L'orientamento relativo del satellite rispetto al suo sistema di riferimento è misurato a bordo tramite un sistema ottico detto star trackers, che esegue i calcoli in base alle sue osservazioni sulla posizione delle stelle, e ad una girobussola (una bussola che mantiene una determinata direzione ma che non si basa sulla misura del campo elettromagnetico). La relazione tra l'orientamento del satellite e il sistema di coordinate della camera di IKONOS II sono descritte dall'interclock angles, che è stato determinato prima del lancio durante le operazioni di assemblaggio e poi raffinato da una calibrazione effettuata in volo. L'utilizzo di queste tecnologie permette di conoscere la posizione e l'orientamento di IKONOS con un'elevata accuratezza, con o senza il controllo a terra.

L'orientamento interno della camera è descritto dal Field Angle Map (FAM), che comprende sia i parametri di distorsione ottica che la geometria del sensore, e permette di determinare ogni pixel nel sistema di riferimento della camera.

Combinando orientamento del satellite, interclock angles e FAM è possibile calcolare la posizione di ogni punto presente nelle immagini [25].

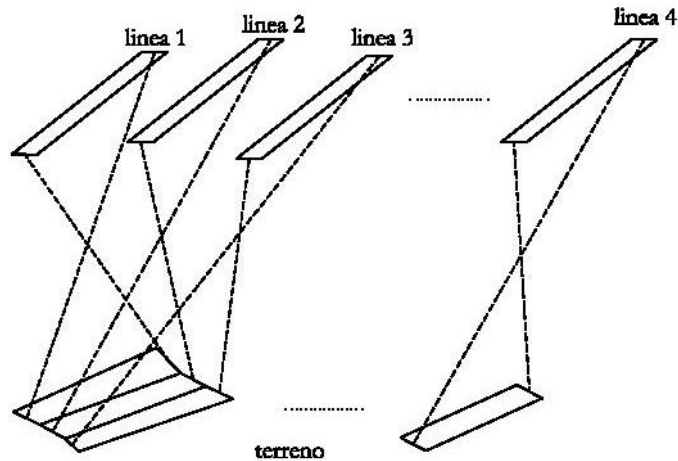


Figura A.I-6 - Composizione dell'immagine nel tempo con un sensore pushbroom

In generale, il sistema di presa associa le coordinate dell'oggetto alle coordinate dell'immagine, e il sistema di presa è basato sulla geometria interna ed esterna e su altre proprietà fisiche del sensore. Per il sensore di tipo pushbroom da 1m di GSD installato sul satellite la completa parametrizzazione del sistema diventa quindi estremamente complessa. Proprio per questo motivo Space Imaging, per semplificare l'utilizzo delle immagini IKONOS, utilizza le funzioni razionali polinomiali: gli RPC sono pertanto distribuiti con tutte le immagini stereo e con quelle del tipo Geo Ortho Kit image.

I prodotti disponibili sono infatti di tre tipi: *Carterra Geo*, *Carterra Orthorectified* e *Standard Stereo*.

- *Carterra Geo* è un prodotto geometricamente "corretto", ottenuto proiettando l'immagine sull'ellissoide WGS84 non considerando la morfologia. E' disponibile con risoluzioni nominali di 1m nel pancromatico e 4m nel multispettrale in coordinate cartografiche UTM-WGS84. Le risoluzioni effettive possono variare e vengono indicate nel file di metadati a corredo dell'immagine.

Nel processo di proiezione vengono in parte rimosse le distorsioni dell'immagine introdotte dalla geometria dell'acquisizione e viene ricampionata l'immagine ottenendo pixel di dimensioni uniformi, uguali alla risoluzione effettiva. La precisione planimetrica è di 25m (1 σ) in quanto non viene impiegato un modello del terreno durante l'ortorettifica, per cui le immagini non vengono corrette per spostamenti del terreno dovuti a variazioni di quota.

I prodotti *Carterra Geo* possono essere corredati (con costo addizionale) dell'Image Geometry Model (IGM) (prodotto *Geo Ortho Kit*), un modello polinomiale della geometria del sensore necessario per un'eventuale successiva ortorettificazione dell'immagine basata su un appropriato modello digitale del terreno e su adeguati punti di controllo.

L'accuratezza finale del processo di ortorettificazione dipende non solo dalla qualità e dalla definizione del DEM e dei GCP, ma anche dall'angolo di presa (Sensor Elevation Angle) con il quale il satellite acquisisce l'immagine, che dovrebbe essere limitato all'intervallo $72^{\circ}\pm 90^{\circ}$ (quindi quasi nadirale).

- I prodotti *Carterra Orthorectified* sono immagini ortorettificate e georiferite rispetto ad uno specifico sistema di proiezione ed ellissoide; le immagini vengono ricampionate come nel caso del prodotto Carterra Geo.

Sono disponibili quattro differenti livelli di accuratezza (1σ):

- *Carterra Reference*. Specifico per applicazioni GIS che richiedono un basso livello di accuratezza; la precisione planimetrica è di 12m, in linea con i requisiti di una cartografia in scala 1:50000; il prezzo del prodotto (*Reference A*, *Reference B*) varia a seconda che il DEM venga o meno fornito dal cliente;
- *Carterra Pro*. Specifico per applicazioni ambientali, urbanistiche e socio-economiche; la precisione planimetrica è di 5m, in linea con i parametri richiesti per la produzione cartografica in scala 1:25000; il prezzo del prodotto (*Pro A*, *Pro B*) varia a seconda che il DEM venga o meno fornito dal cliente;
- *Carterra Precision*. Specifico per mappe urbane, catastali ed applicazioni GIS di precisione; la precisione planimetrica è di 2m, in linea con i requisiti di una cartografia in scala 1:10000; necessita della fornitura, da parte del cliente, dei punti di controllo a terra, altrimenti forniti anche dal rivenditore con un costo addizionale valutato caso per caso;
- *Carterra Precision Plus*. È il prodotto più preciso: la precisione planimetrica è di 1 m, in linea con i parametri richiesti per la produzione cartografica in scala 1:5000; necessita della fornitura, da parte del cliente, dei punti di controllo a terra, altrimenti forniti anche dal rivenditore con un costo addizionale valutato caso per caso.

- I prodotti *Standard Stereo* sono ottenuti da stereocoppie acquisite nello stesso passaggio orbitale, minimizzando così le variazioni di luminosità; le immagini sono ricampionate a 1m in modo da permetterne una più facile visualizzazione. La coppia stereoscopica viene rilasciata insieme al modello polinomiale della geometria del sensore, che permette un'elaborazione di tipo fotogrammetrico e la creazione del modello digitale del terreno tramite l'uso dei più comuni software commerciali. Solitamente un'immagine è acquisita con un angolo di elevazione maggiore di 72° , l'altra con valori superiori a 60° in modo da avere un angolo di convergenza di $30^\circ \div 45^\circ$ tra le due.

Sono distribuiti in due differenti livelli di accuratezza (1σ):

- *Reference Stereo*. Precisione di 12m in planimetria e di 13m in quota;
- *Precision Stereo*. Precisione di 1m in planimetria e di 2m in quota; necessitano della fornitura, da parte del cliente, dei punti di controllo a terra, altrimenti forniti anche dal rivenditore con un costo addizionale valutato caso per caso.

Prodotto	Accuratezza planimetrica		Ortorettifica	Angolo off nadir
	CE90 [m]	RMSE [m]		
Geo	15.0*	/	no	60°÷90°
Standard ortho	50.0**	25.0	sì	60°÷90°
Reference	25.4	11.8	sì	60°÷90°
Pro	10.2	4.8	sì	66°÷90°
Precision	4.1	1.9	sì	72°÷90°
Precision plus	2.0	0.9	sì	75°÷90°
*: derivante solo da variazioni nel terreno;				
***: possibili valori fino a 75m per il CE90 in aree sottosviluppate o con rilievi elevati				

Tabella A.I-1 - Riassunto delle caratteristiche dei differenti prodotti per il satellite IKONOS II

Sia per il prodotto Carterra Geo che per quelli Carterra Pro il prezzo varia notevolmente a seconda che l'immagine sia d'archivio o di nuova acquisizione. Per tutti i prodotti vi sono limiti sulla superficie minima ordinabile (~100Km²).

IKONOS II	
Altitudine dell'orbita	681 Km
Tipo di orbita	polare eliosincrona
Inclinazione dell'orbita	98.1°
Velocità in orbita	7.5 Km/s
Velocità a terra	6.8 Km/s
Periodo orbitale	98 min
Sensore pancromatico	SI
Sensore multispettrale	SI
Swath	11.3 Km al nadir (13.8 Km con angolo di off nadir di 26°)
Modalità di acquisizione	sincrona
Dimensione della scena	120 Km ²
Lunghezza minima dell'immagine	11 Km
Lunghezza massima di un'immagine monoscopica	1000 Km
Lunghezza massima di un'immagine stereoscopica	400 Km
Risoluzione nominale del pixel a terra in pancromatico	0.82 m al nadir (1.0 m con angolo di off nadir di 26°)
Risoluzione nominale del pixel a terra in multispettrale	3.2 m al nadir (4.0 m con angolo di off nadir di 26°)
Intervallo spettrale del pancromatico	0.45 -0.90 μm
Intervallo spettrale banda 1 - blu	0.45 -0.55 μm
Intervallo spettrale banda 2 - verde	0.51 -0.61 μm
Intervallo spettrale banda 3 - rosso	0.64 -0.72 μm
Intervallo spettrale banda 4 - infrarosso vicino	0.77 -0.88 μm
Risoluzione radiometrica	11 bit per pixel
Massimo angolo off-nadir	26°
Lunghezza focale	10 m
Dimensione del pixel (pancromatico)	12 μm
Periodo di rivisitazione al nadir	14 gg
Periodo di rivisitazione off-nadir 0° - 15°	2.9 gg
Periodo di rivisitazione off-nadir > 15°	1.5 gg
Ora di attraversamento dell'equatore	10.30 a.m. (tempo solare)
Metodo di ricampionamento	bicubico
Copertura nuvolosa	20%
Stereocoppie	SI
Disponibilità modello geometrico del sensore	SI, a pagamento

Tabella A.I-2 - Caratteristiche principali del satellite IKONOS II

A.I.2 GeoEye-1

Il satellite GeoEye-1, lanciato nel settembre 2008 dalla Vandenberg Air Force Base in California, ha la più alta risoluzione tra i satelliti commerciali attualmente in orbita e può acquisire immagini con una risoluzione al suolo di 0.41m in pancromatico e di 1.65m in multispettrale. E' comunque prevista una clausola con il governo degli Stati Uniti secondo la quale le immagini devono essere ricampionate a 0.5m per tutti i consumatori non esplicitamente approvati dal governo.



Figura A.I-7 - Satellite GeoEye-1

Il satellite compie quasi 15 orbite al giorno volando ad un'altitudine di 681Km ad una velocità orbitale di 7.5Km/sec, garantendo un tempo di rivisitazione di circa tre giorni (pari a 8.3 giorni per prese nadirali). La sua orbita pseudo-polare è eliosincrona, tale da garantire il passaggio sopra ad una qualsiasi area del globo attorno alle 10:30 ora locale.

Il satellite monta la tecnologia di IKONOS ma migliorata a tal punto che è più veloce per il 40% nell'acquisire immagini pancromatiche e per il 25% per le multispettrali; la camera installata permette di acquisire stereocoppie along ed across track, ruotando in avanti e indietro e lateralmente, garantendo uno swath di 15.2Km.

L'errore di posizionamento di un oggetto è definito in relazione ad un livello di confidenza circolare del 90% (CE90) ed è pari a 3m: un qualunque oggetto può essere identificato con tale distanza massima rispetto alla sua posizione reale senza l'impiego di alcun punto di controllo per raffinare l'orientamento.

Esistono principalmente 3 macrocategorie di prodotti:

- il GeoVisual è un prodotto non corretto, che può essere generalmente utilizzato per rilevamento delle modifiche al territorio.
- il GeoProfessional è il prodotto corretto e georeferenziato, direttamente utilizzabile in applicazioni GIS.
- il prodotto GeoStereo è una stereocoppia formata da immagini di tipo GeoProfessional, ed è indicato per la creazione di DEM.

GeoEye-1	
Altitudine dell'orbita	681 Km
Tipo di orbita	polare eliosincrona
Inclinazione dell'orbita	98°
Velocità	7.5 Km/s
Periodo orbitale	98 min
Sensore pancromatico	SI
Sensore multispettrale	SI
Swath	15.2 Km al nadir
Modalità di acquisizione	sincrona
Dimensione della scena	225 Km ²
Risoluzione nominale del pixel a terra in pancromatico	0.41 m al nadir
Risoluzione nominale del pixel a terra in multispettrale	1.65 m al nadir
Massima risoluzione (target a 40° di latitudine), off nadir di 10°	0.42 m
Massima risoluzione (target a 40° di latitudine), off nadir di 28	0.50 m
Massima risoluzione (target a 40° di latitudine), off nadir di 35	0.59 m
Intervallo spettrale del pancromatico	0.45 – 0.8 µm
Intervallo spettrale banda 1 - blu	0.45 – 0.51 µm
Intervallo spettrale banda 2 - verde	0.51 – 0.58 µm
Intervallo spettrale banda 3 - rosso	0.655 – 0.69 µm
Intervallo spettrale banda 4 - infrarosso vicino	0.78 – 0.92 µm
Risoluzione radiometrica	11 bit
Massimo angolo off-nadir	35°
Periodo di rivisitazione	< 3 gg
Periodo di rivisitazione al nadir	8.3 gg
Periodo di rivisitazione (target a 40° di latitudine), off nadir di 10°	8.3 gg
Periodo di rivisitazione (target a 40° di latitudine), off nadir di 28	2.8 gg
Periodo di rivisitazione (target a 40° di latitudine), off nadir di 35	2.1 gg
Ora di attraversamento dell'equatore	10.30 a.m. (tempo solare)
Copertura nuvolosa	ND
Stereocoppie	SI

Tabella A.I-3 - Caratteristiche principali del satellite GeoEye-1

Appendice II Specifiche tecniche per modelli altimetrici da impiegare nella modellazione idraulica

Caratteristica	Livello			
	5	6	7	8
tipologia	DEM, DSM	DDEM, DDSM	DDEM, DDSM	DDEM, DDSM
precisione in quota [m]				
in campo aperto	0.20	0.30	0.15	0.10
cop.arborea >70%, arbusti >50% (nel caso di DEM)	0.40	0.60	0.25	0.15
edifici (nel caso di DSM)	0.27	0.40	0.20	0.13
tolleranza in quota [m]				
in campo aperto	0.40	0.60	0.30	0.20
cop.arborea >70%, arbusti >50% (nel caso di DEM)	0.80	1.20	0.60	0.30
edifici (nel caso di DSM)	0.54	0.80	0.40	0.26
errore sistematico altimetrico max. [m]	0.10	0.15	0.08	0.05
precisione planimetrica [m]	0.20	0.30	0.15	0.10
tolleranza planimetrica [m]	0.40	0.60	0.30	0.20
passo di griglia [m]	2	1	0.50	0.10-0.20
	breakline o punti quotati per oggetti che causano irregolarità del terreno maggiori di 0.30 m			
breakline necessarie per i seguenti oggetti	limiti delle strade (possibilmente ciglio stradale e del piede della scarpa), dighe (ciglio e piede), ponti, viadotti, linee di costa di laghi, fiumi e mari, impluvi; le breakline devono seguire il terreno con la precisione sopra specificata	occorre la definizione di breakline solamente per linee di costa di laghi, fiumi e mari		
delimitazione delle aree non rappresentabili ("zone morte")	edifici, specchi d'acqua, zone di minor precisione per densa vegetazione. Le linee di delimitazione devono indicare la quota del terreno, altrimenti (ad es. se appartenenti ad un tetto) devono avere quota convenzionale; gli specchi d'acqua devono seguire il terreno	specchi d'acqua, zone di minor precisione per densa vegetazione. Le linee di delimitazione devono indicare la quota del terreno; gli specchi d'acqua devono seguire il terreno		
delimitazione della zona rappresentata	sempre presente	sempre necessaria		
applicazioni principali	modellazione idraulica delle zone esondabili; applicazioni ingegneristiche			
	ortofoto ordinarie fino alla scala:			
	1:500	1:1000	1:500	
	ortofoto di precisione fino alla scala:			
	/	1:5000	1:2000	1:500

aree di applicazione	aree a rischio di inondazione aventi pendenza media inferiore a 1%			
	zone da rappresentarsi alla scala			
	1:500	1:2000	1:2000, 1:1000, 1:500	1:1000, 1:500
sorgente di dati	scanner laser con controllo fotogrammetrico, CT 1:500	scanner laser con controllo fotogrammetrico, CTR 1:2000-1:1000	scanner laser con controllo fotogrammetrico, CT 1:1000-1:500	integrazione tra laser scanner e fotogrammetria, CT 1:500 e/o carta dei tetti alla stessa scala, laser scanner terrestre, tecniche di rilievo dirette (livellaz. geom, GNSS e tecniche celerimetriche moderne

Tabella A.II-1 - Specifiche tecniche dei modelli altimetrici di livello 5÷8 [13]

Appendice III Stereocoppia IKONOS II dell'area di Ferrara

A.III.1 Coordinate dei GPs

rilievo 2005					rilievo 2009				
Tipo	ID	Est [m]	Nord [m]	H [m]	Tipo	ID	Est [m]	Nord [m]	H [m]
GCP	1	705698.936	4967952.651	9.879	GCP	30	706867.822	4974319.844	8.440
GCP	2	706103.868	4973279.942	7.312	GCP	31	704066.648	4974081.075	5.905
GCP	3	707093.874	4965805.65	7.109	GCP	32	703056.381	4972825.548	6.478
GCP	4	704868.223	4965147.776	7.713	GCP	33	701301.623	4972275.594	6.521
GCP	5	708151.254	4969574.347	5.468	GCP	34	707644.91	4971686.174	4.068
GCP	6	703381.203	4963290.957	15.358	GCP	36	709343.047	4971735.661	4.760
GCP	7	702973.321	4975176.619	6.341	GCP	37	709351.014	4971737.527	4.793
GCP	8	703606.014	4969069.573	8.154	GCP	38	708948.818	4967780.128	3.749
GCP	9	707496.954	4973269.401	6.007	GCP	39	708944.834	4966265.669	5.191
GCP	10	708445.11	4964710.675	8.192	GCP	41	706949.689	4963676.785	5.175
GCP	14	704481.283	4968388.877	10.442	GCP	42	704588.857	4963864.002	7.653
GCP	15	702008.879	4969686.954	10.436	GCP	43	705001.94	4966413.786	7.005
GCP	16	701694.402	4969751.853	10.966	GCP	44	702126.903	4966198.549	18.476
GCP	17	709460.215	4963888.448	4.347	GCP	45	703121.875	4966041.077	8.060
GCP	19	709357.214	4968858.801	3.574	GCP	46	703034.195	4967375.663	9.994
GCP	20	709150.658	4974594.249	5.525	GCP	47	702345.098	4968240.026	10.057
GCP	21	703457.993	4970644.615	6.447	GCP	48	707954.083	4968069.58	4.921
GCP	22	703651.312	4970723.604	5.894	GCP	49	701859.953	4964302.816	11.664
GCP	23	705642.434	4971597.449	5.644	GCP	50	709422.558	4966527.424	6.973
GCP	28	702496.041	4973669.218	4.830	GCP	51	706552.29	4969761.429	4.965
					GCP	52	707010.842	4968878.624	6.232
					GCP	53	707014.909	4968877.761	6.586
					GCP	54	706012.767	4974239.278	6.019

Tabella A.III-1 – IKONOS II: coordinate dei GCPs impiegati

A.III.2 Coordinate dei TP:

Tipo	ID	Immagine 000		Immagine 001	
		I [px]	J [px]	I [px]	J [px]
TP	AT0004_05	742.3	4377.6	740.375	4385.5
TP	AT0005_05	794.5	7680.5	793.8	7684.1
TP	AT0006_05	7641.5	7556.5	7641.563	7555.5
TP	AT0007_05	732.8	11101.8	731.8	11105
TP	AT0008_05	7712.5	10800.5	7712.4	10800.4
TP	AT0010_05	828.5	3143.5	828.6	3142.9
TP	AT0011_05	4284.5	3028.5	4283.5	3034.5
TP	AT0012_05	880.5	4990.5	879.5	4991.5
TP	AT0013_05	4387.5	4997.5	4386.1	5004.7
TP	AT0014_05	7802.5	5145.1875	7802.6	5144.2
TP	AT0015_05	928.5	7049.5	927.5	7053.2
TP	AT0016_05	4216.5	6892.5	4215.813	6894.563
TP	T0001	2833.8	10036	2833.112	10037.69
TP	T0002	2623.8	7830	2623.5	7831.8
TP	T0003	5261.7	10066.4	5261.625	10066.5
TP	T0004	4820.3	11879.4	4819.281	11879.44
TP	T0005	6136	707.8125	6135.9	707.9
TP	T0006	3683.0064	158.9989	3682.75	160
TP	T0007	2316.3	3215.2	2316.5	3214.9
TP	T0008	6232.9375	3611.8125	6232.9	3610
TP	T0009	1867	8787.9	1867	8789.813
TP	T0010	7464.1	9039.9	7464	9039.938
TP	T0018_05	2422.5	4541.6	2421.5	4545.5
TP	T0019_05	2340.5	4546.5	2339.5	4550.6
TP	T0021_05	7833	405.3	7831.8	410.3
TP	T0022_05	7386.5	11836.6875	7385.6	11840.5
TP	T0023_05	3464.9375	1729.75	3464.938	1735.938
TP	T0024_05	5530.5	6905	5530.5	6906.8
TP	T0025_05	7017	8268.3	7016.8	8268
TP	T0026_05	7446	3401.8	7446	3399.9

Tipo	ID	Immagine 000		Immagine 001	
		I [px]	J [px]	I [px]	J [px]
TP	G01	7204.93	2212	7204.93	2211.93
TP	G02	758.93	1372.93	758.93	1372.93
TP	G03	6599.93	11208.8	6599	11209.88
TP	G04	4953	6396	4952.5	6397.875
TP	G05	2461.93	11123.93	2460.93	11128.93
TP	G06	2401.94	8262.94	2401.688	8264.813
TP	G07	4402	3682.94	4402	3682.89
TP	G08	839	4510	839	4510.94
TP	G09	7053.3125	6678.3125	7053	6678.94
TP	G10	6509	9483.94	6508	9486.94
TP	G11	5646.95	990	5647	991.4375
TP	G12	3139	3347.05	3138.95	3347.05
TP	G13	6737.89	5315.95	6737.95	5316
TP	G14	3949.95	9896	3950	9897
TP	G15	664	11964.95	663	11968
TP	G16	2670	5655	2669.125	5658.938
TP	G17	6656.95	3945.95	6656.95	3945.95
TP	G18	1095	9070.32	1094	9074.688
TP	G19	4154	11171.95	4153.95	11173
TP	G20	5922.95	9416	5922.25	9417.938

Tabella A.III-2 - IKONOS II: coordinate dei TP's impiegati

A.III.3 Distribuzioni dei GCPs usati per l'orientamento

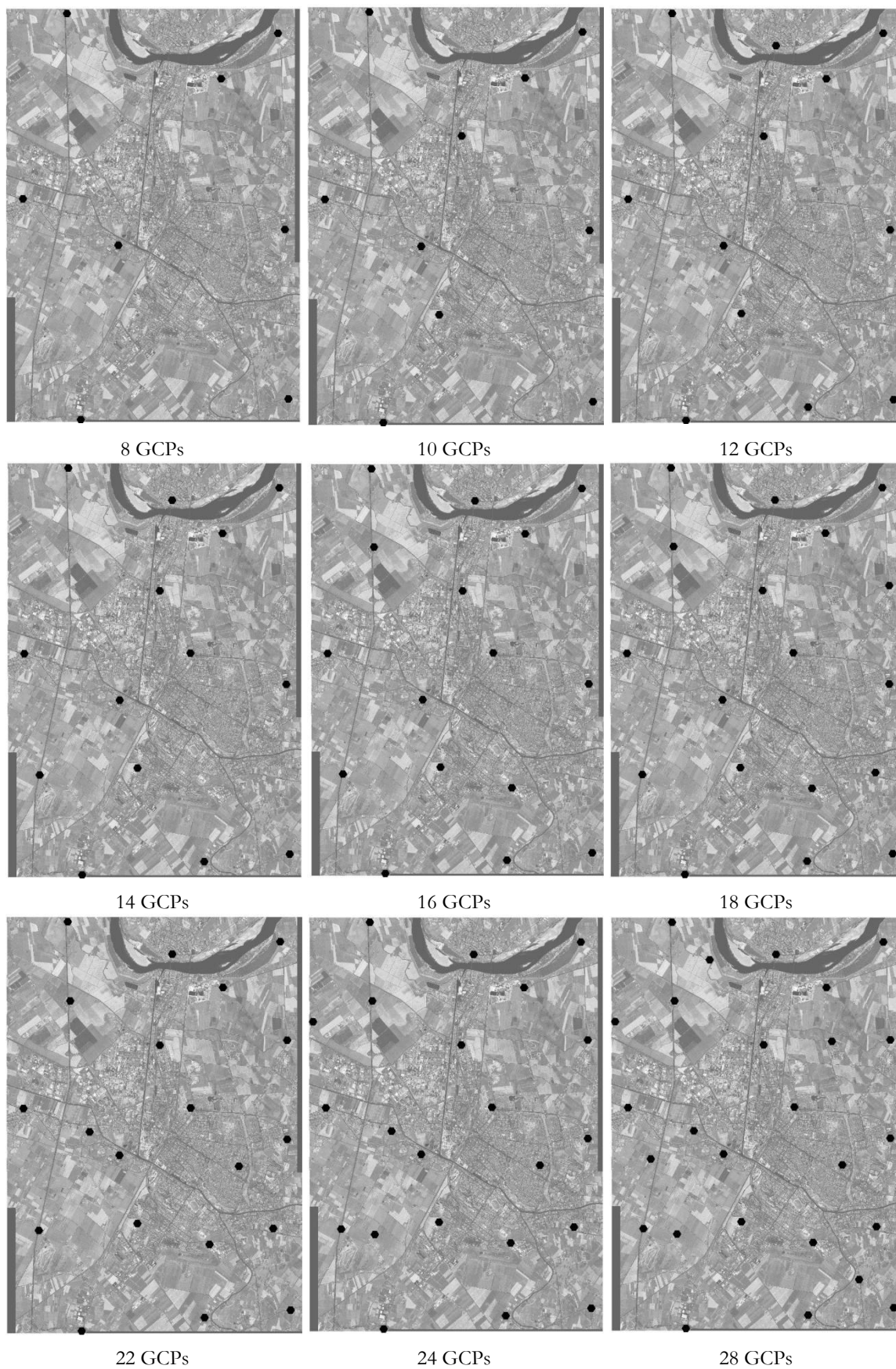


Figura A.III-1 - IKONOS II: distribuzioni dei GCPs per 9 dei test di orientamento eseguiti

A.III.4 Test di orientamento

RMSE GCPs				RMSE CPs			
n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]
4	0.00	0.00	0.00	4	0.89	2.82	3.33
6	0.02	0.09	0.05	6	0.67	1.69	1.54
6*	0.00	0.00	0.00	6*	1.68	0.92	1.04
8	0.08	0.18	0.21	8	0.86	1.37	1.23
10	0.23	0.29	0.38	10	0.59	0.87	1.05
12	0.23	0.29	0.44	12	0.69	0.77	0.94
14	0.23	0.34	0.46	14	0.69	0.79	0.89
16	0.22	0.33	0.44	16	0.73	0.80	0.92
18	0.29	0.38	0.51	18	0.85	0.81	0.88
20	0.29	0.40	0.53	20	0.80	0.78	0.85
20*	0.36	0.45	0.46	20*	0.59	0.64	0.85
22	0.42	0.38	0.77	22	0.45	0.73	0.68
24	0.43	0.42	0.77	24	0.43	0.74	0.59
26	0.42	0.45	0.74	26	0.43	0.70	0.63
28	0.41	0.44	0.72	28	0.45	0.75	0.68
30	0.41	0.44	0.75	30	0.48	0.72	0.72
32	0.41	0.44	0.72	32	0.50	0.79	0.79
34	0.40	0.44	0.72	34	0.56	0.83	0.82
36	0.42	0.50	0.70	36	0.43	0.63	0.82
38	0.42	0.53	0.69	38	0.50	0.37	1.03
40	0.41	0.52	0.70	40	0.58	0.26	0.47
41	0.41	0.51	0.69	41	\	\	\

Tabella A.III-3 - IKONOS II: residui orientamento OrthoEngine v.10.2, modello rigoroso (: test di orientamento eseguiti con la seconda distribuzione dei GCPs)*

RMSE GCPs				RMSE CPs			
n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]
4	\	\	\	4	\	\	\
6	0.02	0.00	0.01	6	0.61	0.74	0.82
6*	0.02	0.01	0.01	6*	0.70	0.75	0.97
8	0.02	0.02	0.01	8	0.67	0.69	0.80
10	0.02	0.02	0.01	10	0.66	0.67	0.74
12	0.03	0.02	0.02	12	0.46	0.67	0.76
14	0.03	0.02	0.02	14	0.48	0.63	0.75
16	0.03	0.02	0.02	16	0.50	0.64	0.76
18	0.03	0.02	0.02	18	0.52	0.65	0.73
20	0.03	0.02	0.02	20	0.51	0.67	0.70
20*	0.03	0.02	0.02	20*	0.65	0.62	0.75
22	0.03	0.02	0.02	22	0.42	0.70	0.67
24	0.03	0.02	0.02	24	0.44	0.73	0.65
26	0.03	0.02	0.02	26	0.47	0.69	0.66
28	0.03	0.02	0.02	28	0.45	0.73	0.71
30	0.03	0.02	0.02	30	0.48	0.75	0.71
32	0.03	0.02	0.02	32	0.51	0.81	0.77
34	0.03	0.02	0.02	34	0.58	0.87	0.80
36	0.03	0.03	0.02	36	0.25	0.63	0.84
38	0.03	0.03	0.02	38	0.25	0.29	0.94
40	0.03	0.03	0.02	40	0.22	0.34	1.15
41	0.03	0.03	0.02	41	\	\	\

Tabella A.III-4 - IKONOS II: residui orientamento SISAR, modello rigoroso (*: test di orientamento eseguiti con la seconda distribuzione dei GCPs)

RMSE GCPs				RMSE CPs			
n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]
4	4	\	\	4	\	\	\
6	6	0.08	0.33	6	0.57	0.79	0.86
6*	6	0.32	0.50	6*	0.60	0.64	1.18
8	8	0.29	0.46	8	0.59	0.66	0.92
10	10	0.37	0.44	10	0.53	0.65	0.89
12	12	0.50	0.41	12	0.48	0.64	0.85
14	14	0.48	0.42	14	0.48	0.62	0.81
16	16	0.47	0.42	16	0.49	0.62	0.84
18	18	0.50	0.42	18	0.47	0.64	0.82
20	20	0.48	0.44	20	0.48	0.65	0.73
20*	20	0.51	0.49	20*	0.48	0.58	0.77
22	22	0.49	0.43	22	0.46	0.67	0.63
24	24	0.47	0.44	24	0.47	0.71	0.65
26	26	0.47	0.45	26	0.48	0.69	0.69
28	28	0.48	0.44	28	0.45	0.74	0.74
30	30	0.47	0.45	30	0.48	0.74	0.71
32	32	0.45	0.45	32	0.53	0.80	0.78
34	34	0.44	0.45	34	0.60	0.87	0.86
36	36	0.48	0.53	36	0.30	0.60	0.96
38	38	0.48	0.55	38	0.19	0.23	0.96
40	40	0.47	0.54	40	0.33	0.16	1.10
41	41	0.46	0.53	41	\	\	\

Tabella A.III-5 - IKONOS II: residui orientamento SISAR, RFM (*: test di orientamento eseguiti con la seconda distribuzione dei GCPs)

Appendice IV Stereocoppia GeoEye-1 dell'area di Argenta

A.IV.1 Coordinate dei GPs

Tipo	ID	Est [m]	Nord [m]	H [m]	Tipo	ID	Est [m]	Nord [m]	H [m]
CP	2	724071.457	4946044.567	0.930	GCP	1	723487.489	4947354.813	0.122
CP	3	724582.187	4944903.283	1.082	GCP	8	723231.672	4942487.845	6.986
CP	4	725266.136	4944795.214	2.327	GCP	10	724060.067	4939768.343	8.283
CP	5	725119.133	4944391.080	1.415	GCP	13	725595.180	4946354.172	-0.020
CP	6	724320.557	4944132.406	4.710	GCP	16	725495.727	4943471.172	4.012
CP	7	724992.672	4944032.427	4.858	GCP	17	726532.948	4943350.494	0.436
CP	11	723656.823	4939502.280	8.645	GCP	19	725782.201	4942522.055	4.997
CP	12	725265.081	4947576.001	0.249	GCP	20	728982.805	4947434.381	0.980
CP	14	725682.249	4946434.836	0.750	GCP	23	728188.015	4944707.549	-0.567
CP	15	726817.933	4945532.031	1.308	GCP	24	729695.193	4943969.411	-1.717
CP	18	725620.666	4942897.866	4.770	GCP	25	728537.449	4942748.909	-1.834
CP	21	728669.560	4947469.666	0.691	GCP	28	728300.221	4941459.458	0.812
CP	22	729613.941	4946081.664	-0.848	GCP	30	727128.615	4940666.665	2.590
CP	26	729600.785	4942013.240	-0.088	GCP	35	731898.113	4947363.286	1.605
CP	27	727309.570	4941234.199	0.933	GCP	36	730930.369	4946688.711	-1.897
CP	29	728595.241	4941255.992	0.070	GCP	37	731285.164	4945787.184	-0.002
CP	31	727915.480	4940087.943	3.989	GCP	38	731877.235	4944250.497	-1.510
CP	32	728164.382	4939484.626	3.838	GCP	39	730542.712	4942691.342	-2.242
CP	34	731102.218	4947517.170	0.233	GCP	40	731693.246	4942381.091	-0.230
CP	43	733809.227	4946605.351	-0.037	GCP	41	730652.342	4941541.625	0.264
CP	49	732461.663	4941410.466	0.276	GCP	42	730018.853	4940997.004	0.394
CP	51	734875.059	4941793.276	3.643	GCP	44	734666.255	4946257.520	0.275
CP	53	732758.805	4940312.749	2.430	GCP	45	733048.857	4945131.075	0.750
CP	55	727157.455	4940681.564	2.524	GCP	46	734463.880	4944510.048	0.783
CP	59	727383.363	4944188.795	-0.587	GCP	47	732874.851	4943688.755	-2.437
CP	63	724285.594	4944163.863	4.643	GCP	48	734789.934	4942781.027	-0.194
CP	64	724307.598	4944184.679	5.042	GCP	50	733281.523	4941459.864	3.949
CP	65	725114.113	4944391.480	1.435	GCP	52	734627.876	4941449.435	1.849
CP	66	728960.233	4947465.780	0.839	GCP	54	727300.001	4942516.791	-0.210
CP	68	724027.056	4946037.056	0.966	GCP	56	733756.107	4940208.867	1.521
CP	69	724024.333	4946040.373	3.444	GCP	57	730286.603	4940341.067	4.192
CP	72	730937.280	4946706.627	-1.829	GCP	58	727691.497	4946471.451	0.564
CP	73	733264.695	4941454.154	3.938	GCP	60	732623.018	4946420.423	-0.408
CP	74	731871.178	4944250.765	-1.478	GCP	62	728967.492	4940169.056	4.279
CP	75	733647.813	4940493.689	2.717	GCP	67	724088.890	4946017.411	0.943
CP	76	729987.859	4940948.853	0.566	GCP	70	724959.627	4944024.256	4.896
CP	78	726485.913	4943350.000	0.553	GCP	71	725268.622	4947572.933	0.160
CP	80	724579.526	4944883.771	1.111	GCP	77	728182.868	4939469.808	3.850
					GCP	79	724577.882	4944898.784	1.118
					GCP	88901	732596.895	4941727.313	2.126

Tipo	ID	Est [m]	Nord [m]	H [m]	Tipo	ID	Est [m]	Nord [m]	H [m]
elim	9	731304.943	4940449.486	3.228	terreno	asse1	731389.652	4940485.886	3.017
elim	33	729013.741	4939384.482	3.029	terreno	asse10	731219.982	4940424.807	3.003
elim	61	733645.690	4940500.326	2.717	terreno	asse11	731201.455	4940418.093	3.067
IGM	88702	721050.732	4947723.472	4.330	terreno	asse12	731182.379	4940411.171	3.097
IGM	A039	730361.816	4946260.791	1.284	terreno	asse13	731163.571	4940404.549	3.047
IGM	N044	726370.587	4941435.057	3.116	terreno	asse14	731144.839	4940397.995	3.067
IGM	N049	722885.470	4953969.870	1.235	terreno	asse15	731130.393	4940392.196	3.289
IGM	N050	735597.585	4945871.646	-0.579	terreno	asse16	731300.655	4940454.610	2.913
sezione	s1-1	724125.259	4943982.726	7.976	terreno	asse17	731293.685	4940473.427	2.785
sezione	s1-10	724187.751	4944027.410	4.477	terreno	asse18	731286.851	4940492.168	2.730
sezione	s1-11	724189.144	4944028.688	4.288	terreno	asse19	731280.651	4940511.818	2.691
sezione	s1-12	724192.196	4944031.349	4.305	terreno	asse2	731370.690	4940479.135	2.739
sezione	s1-2	724135.997	4943990.877	8.632	terreno	asse20	731274.704	4940530.368	2.770
sezione	s1-3	724148.995	4943998.810	9.364	terreno	asse21	731270.944	4940550.634	2.770
sezione	s1-4	724152.940	4944000.911	9.992	terreno	asse22	731266.385	4940569.416	2.743
sezione	s1-5	724159.216	4944004.926	14.122	terreno	asse23	731261.275	4940589.338	2.856
sezione	s1-6	724160.483	4944005.983	14.621	terreno	asse24	731256.162	4940608.239	2.845
sezione	s1-7	724163.652	4944008.465	14.644	terreno	asse25	731251.369	4940628.008	2.890
sezione	s1-8	724172.626	4944016.237	8.790	terreno	asse26	731246.571	4940646.970	2.929
sezione	s1-9	724181.054	4944022.526	8.286	terreno	asse27	731241.213	4940666.227	3.097
					terreno	asse28	731236.200	4940686.303	3.156
					terreno	asse29	731231.767	4940705.056	3.147
					terreno	asse3	731352.140	4940471.900	2.607
					terreno	asse30	731226.655	4940724.377	3.231
					terreno	asse31	731221.844	4940744.025	3.200
					terreno	asse32	731216.908	4940763.414	3.168
					terreno	asse33	731212.277	4940782.766	3.247
					terreno	asse34	731207.193	4940802.107	3.360
					terreno	asse35	731202.440	4940821.806	3.564
					terreno	asse36	731197.568	4940841.068	3.906
					terreno	asse37	731193.373	4940852.813	4.071
					terreno	asse4	731333.344	4940464.929	2.619
					terreno	asse5	731314.509	4940458.062	2.792
					terreno	asse6	731295.523	4940452.026	2.837
					terreno	asse7	731275.766	4940445.827	2.826
					terreno	asse8	731256.775	4940438.933	2.890
					terreno	asse9	731238.855	4940432.293	2.913

Tabella A.IV-1 - GeoEye-1: coordinate dei GPs impiegati

A.IV.2 Distribuzioni dei GCPs usati per l'orientamento

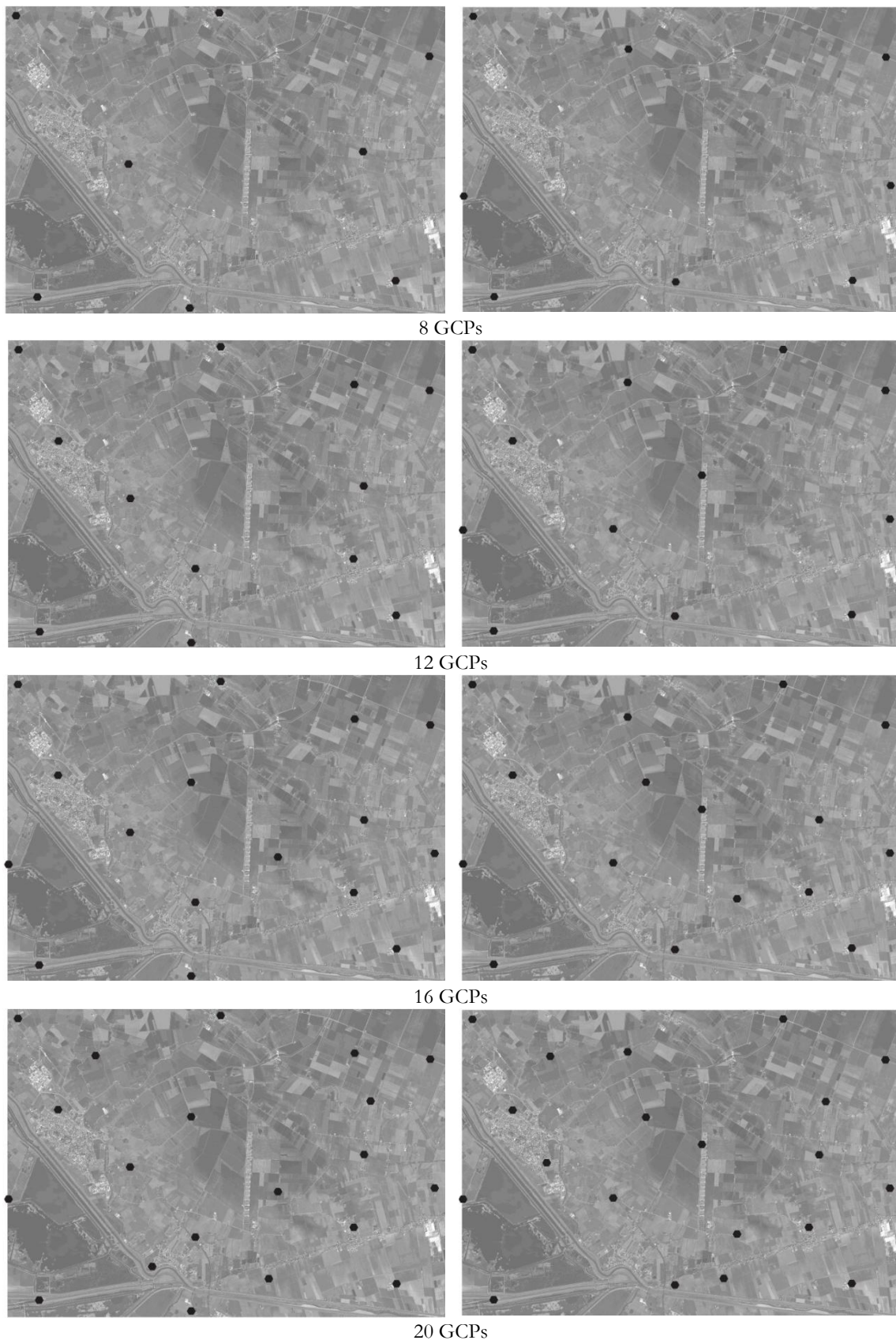


Figura A.IV-1 - GeoEye-1: distribuzioni dei GCPs per 4 dei test di orientamento eseguiti, distribuzione 1 (sinistra), distribuzione 2 (destra)

A.IV.3 Test di orientamento

RMSE GCPs				RMSE CPs				RMSE CPs (fix)			
n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]
8	0.243	0.166	0.726	8	0.241	0.387	1.735	8	0.242	0.437	2.015
10	0.204	0.213	0.784	10	0.208	0.406	1.895	10	0.226	0.455	2.215
12	0.158	0.189	0.626	12	0.204	0.321	1.038	12	0.205	0.340	1.121
14	0.194	0.190	0.600	14	0.228	0.309	0.835	14	0.228	0.328	0.938
16	0.221	0.188	0.560	16	0.165	0.285	0.548	16	0.212	0.288	0.612
18	0.229	0.187	0.641	18	0.163	0.276	0.561	18	0.207	0.269	0.682
20	0.221	0.195	0.602	20	0.169	0.263	0.513	20	0.208	0.265	0.623
22	0.215	0.185	0.575	22	0.174	0.270	0.505	22	0.205	0.260	0.593
24	0.212	0.195	0.563	24	0.180	0.264	0.440	24	0.204	0.262	0.561
26	0.202	0.188	0.539	26	0.182	0.277	0.454	26	0.204	0.263	0.552
28	0.204	0.189	0.534	28	0.183	0.267	0.409	28	0.207	0.249	0.534
30	0.200	0.183	0.521	30	0.196	0.290	0.437	30	0.207	0.249	0.534
32	0.197	0.180	0.516	32	0.203	0.308	0.456	32	0.206	0.244	0.542
34	0.200	0.209	0.540	34	0.221	0.238	0.260	34	0.204	0.229	0.511
36	0.194	0.204	0.528	36	0.263	0.278	0.251	36	0.202	0.226	0.504
38	0.196	0.216	0.519	38	0.152	0.143	0.272	38	0.205	0.227	0.506
40	0.198	0.213	0.515	40	\	\	\	40	0.204	0.228	0.515

Tabella A.IV-2 - GeoEye-1: residui orientamento OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 1

RMSE GCPs				RMSE CPs				RMSE CPs (fix)			
n° GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]
8	0.149	0.081	0.680	8	0.451	0.395	1.375	8	0.430	0.377	1.236
10	0.201	0.167	0.540	10	0.261	0.276	0.517	10	0.280	0.301	0.537
12	0.213	0.244	0.514	12	0.242	0.280	0.561	12	0.256	0.292	0.550
14	0.236	0.249	0.590	14	0.244	0.286	0.563	14	0.251	0.296	0.598
16	0.226	0.227	0.569	16	0.226	0.280	0.579	16	0.225	0.287	0.608
18	0.221	0.219	0.567	18	0.223	0.289	0.575	18	0.209	0.285	0.615
20	0.222	0.211	0.601	20	0.227	0.292	0.596	20	0.204	0.275	0.644
22	0.207	0.248	0.610	22	0.176	0.248	0.566	22	0.203	0.261	0.649
24	0.212	0.241	0.611	24	0.174	0.246	0.518	24	0.204	0.257	0.622
26	0.209	0.234	0.590	26	0.182	0.251	0.532	26	0.205	0.249	0.609
28	0.209	0.242	0.574	28	0.100	0.239	0.556	28	0.205	0.252	0.596
30	0.205	0.238	0.556	30	0.103	0.244	0.607	30	0.202	0.245	0.594
32	0.206	0.231	0.557	32	0.105	0.252	0.630	32	0.203	0.241	0.583
34	0.199	0.226	0.531	34	0.113	0.234	0.685	34	0.203	0.226	0.556
36	0.196	0.220	0.534	36	0.131	0.207	0.568	36	0.203	0.228	0.544
38	0.193	0.215	0.523	38	0.166	0.189	0.498	38	0.204	0.227	0.525
40	0.198	0.213	0.515	40	\	\	\	40	0.204	0.228	0.515

Tabella 6-39 A.IV-3 - GeoEye-1: residui orientamento OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 2

RMSE GCPs				RMSE CPs				RMSE CPs (fix)			
n° GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]
8	0.326	0.386	1.024	8	0.343	0.587	1.965	8	0.328	0.623	2.288
10	0.297	0.678	1.200	10	0.416	0.714	2.700	10	0.483	0.742	3.307
12	0.275	0.526	1.408	12	0.439	0.549	2.745	12	0.482	0.575	3.087
14	0.243	0.446	1.152	14	0.444	0.528	1.943	14	0.485	0.559	2.243
16	0.311	0.417	1.003	16	0.327	0.465	0.940	16	0.377	0.450	1.133
18	0.312	0.399	0.936	18	0.278	0.401	0.957	18	0.334	0.426	1.110
20	0.277	0.382	0.889	20	0.281	0.404	0.939	20	0.315	0.414	0.996
22	0.265	0.382	0.831	22	0.295	0.410	0.828	22	0.317	0.406	0.861
24	0.261	0.400	0.795	24	0.297	0.381	0.725	24	0.314	0.414	0.817
26	0.246	0.385	0.764	26	0.289	0.394	0.757	26	0.308	0.414	0.821
28	0.250	0.380	0.763	28	0.284	0.359	0.619	28	0.303	0.396	0.757
30	0.247	0.365	0.746	30	0.297	0.374	0.588	30	0.302	0.398	0.743
32	0.246	0.353	0.737	32	0.326	0.412	0.645	32	0.302	0.397	0.751
34	0.243	0.380	0.733	34	0.343	0.289	0.711	34	0.296	0.386	0.729
36	0.251	0.372	0.739	36	0.403	0.261	0.562	36	0.296	0.378	0.698
38	0.248	0.371	0.749	38	0.329	0.190	0.264	38	0.296	0.385	0.734
40	0.252	0.364	0.731	40	\	\	\	40	0.302	0.385	0.736

Tabella A.IV-4 - GeoEye-1: residui orientamento OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 1, operatore 2

RMSE GCPs				RMSE CPs				RMSE CPs (fix)			
n° GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n° GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n° GCP	E[m]	N[m]	Up[m]
8	0.710	0.432	1.954	8	0.343	0.512	5.279	8	0.312	0.663	6.531
10	0.827	0.582	2.665	10	0.294	0.578	7.227	10	0.332	0.743	8.937
12	0.432	0.283	1.408	12	0.301	0.412	2.371	12	0.329	0.529	2.792
14	0.394	0.300	1.337	14	0.338	0.398	1.849	14	0.368	0.538	2.386
16	0.394	0.261	1.039	16	0.261	0.323	0.740	16	0.314	0.428	1.057
18	0.378	0.242	1.043	18	0.257	0.350	0.840	18	0.312	0.429	1.158
20	0.347	0.230	0.959	20	0.264	0.361	0.801	20	0.313	0.426	1.078
22	0.330	0.268	0.890	22	0.276	0.300	0.706	22	0.311	0.408	0.954
24	0.333	0.280	0.863	24	0.271	0.282	0.616	24	0.307	0.411	0.936
26	0.321	0.283	0.820	26	0.264	0.268	0.611	26	0.307	0.414	0.912
28	0.325	0.282	0.799	28	0.264	0.233	0.552	28	0.300	0.409	0.868
30	0.319	0.273	0.770	30	0.280	0.243	0.553	30	0.301	0.410	0.846
32	0.312	0.264	0.761	32	0.302	0.265	0.607	32	0.300	0.409	0.863
34	0.315	0.268	0.751	34	0.281	0.241	0.670	34	0.311	0.403	0.853
36	0.317	0.262	0.758	36	0.335	0.204	0.542	36	0.311	0.394	0.821
38	0.315	0.256	0.753	38	0.062	0.158	0.271	38	0.321	0.395	0.820
40	0.307	0.253	0.730	40	\	\	\	40	0.320	0.396	0.808

Tabella A.IV-5 - GeoEye-1: residui orientamento OrthoEngine v.10.3, modello rigoroso, distribuzione 1, operatore 3

RMSE GCPs				RMSE CPs				RMSE CPs (fix)			
n° GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]
6	0.00	0.00	0.00	6	0.44	1.14	3.83	6	0.45	1.28	3.87
8	0.005	0.004	0.002	8	0.204	0.365	0.779	8	0.263	0.414	0.835
10	0.005	0.003	0.002	10	0.218	0.348	0.619	10	0.261	0.382	0.729
12	0.005	0.004	0.002	12	0.244	0.257	0.581	12	0.273	0.271	0.670
14	0.005	0.004	0.002	14	0.207	0.268	0.568	14	0.264	0.275	0.649
16	0.005	0.004	0.002	16	0.187	0.276	0.506	16	0.265	0.271	0.650
18	0.004	0.004	0.002	18	0.193	0.269	0.526	18	0.267	0.249	0.643
20	0.004	0.004	0.002	20	0.171	0.260	0.514	20	0.262	0.246	0.638
22	0.004	0.004	0.002	22	0.183	0.268	0.521	22	0.266	0.241	0.631
24	0.004	0.004	0.002	24	0.179	0.264	0.547	24	0.263	0.240	0.629
26	0.004	0.004	0.002	26	0.176	0.278	0.456	26	0.260	0.238	0.620
28	0.004	0.004	0.002	28	0.172	0.284	0.483	28	0.260	0.222	0.623
30	0.004	0.004	0.002	30	0.193	0.309	0.509	30	0.263	0.220	0.629
32	0.004	0.004	0.002	32	0.210	0.336	0.464	32	0.264	0.216	0.626
34	0.004	0.004	0.001	34	0.232	0.257	0.537	34	0.267	0.201	0.628
36	0.004	0.004	0.001	36	0.239	0.312	0.458	36	0.263	0.200	0.638
38	0.004	0.004	0.001	38	0.283	0.204	0.498	38	0.263	0.205	0.638
40	0.004	0.004	0.001	40	\	\	\	40	0.261	0.202	0.634

Tabella A.IV-6 - GeoEye-1: residui orientamento SISAR, modello rigoroso, distribuzione 1

RMSE GCPs				RMSE CPs				RMSE CPs (fix)			
n° GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n° GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n° GCP	E[m]	N[m]	Up[m]
6	0.01	0.00	0.00	6	0.87	1.68	3.15	6	0.94	1.53	3.03
8	0.006	0.003	0.002	8	0.253	0.274	0.838	8	0.292	0.296	0.762
10	0.005	0.004	0.002	10	0.272	0.265	0.806	10	0.296	0.287	0.723
12	0.005	0.005	0.002	12	0.281	0.219	0.707	12	0.299	0.227	0.667
14	0.005	0.005	0.002	14	0.253	0.223	0.630	14	0.288	0.226	0.633
16	0.005	0.005	0.002	16	0.238	0.219	0.619	16	0.285	0.227	0.617
18	0.005	0.005	0.002	18	0.231	0.217	0.613	18	0.285	0.220	0.606
20	0.005	0.005	0.002	20	0.234	0.225	0.643	20	0.284	0.215	0.607
22	0.005	0.005	0.002	22	0.233	0.164	0.556	22	0.277	0.211	0.596
24	0.004	0.005	0.002	24	0.215	0.171	0.557	24	0.270	0.208	0.610
26	0.004	0.004	0.002	26	0.232	0.178	0.581	26	0.273	0.206	0.619
28	0.005	0.005	0.002	28	0.227	0.120	0.525	28	0.270	0.217	0.621
30	0.004	0.005	0.002	30	0.215	0.089	0.550	30	0.267	0.204	0.642
32	0.004	0.005	0.002	32	0.234	0.098	0.550	32	0.266	0.203	0.644
34	0.004	0.005	0.002	34	0.273	0.097	0.608	34	0.267	0.201	0.641
36	0.004	0.004	0.001	36	0.271	0.078	0.360	36	0.263	0.202	0.638
38	0.004	0.004	0.001	38	0.355	0.110	0.505	38	0.263	0.202	0.638
40	0.004	0.004	0.001	40	\	\	\	40	0.261	0.202	0.634

Tabella A.IV-7 - GeoEye-1: residui orientamento SISAR, modello rigoroso, distribuzione 2

RMSE GCPs				RMSE CPs				RMSE CPs (fix)			
n° GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n° GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n° GCP	E[m]	N[m]	Up[m]
6	0.00	0.00	0.00	6	0.54	1.06	4.12	6	0.61	1.12	4.36
8	0.005	0.003	0.002	8	0.346	0.593	1.089	8	0.388	0.568	1.092
10	0.005	0.006	0.002	10	0.341	0.477	0.926	10	0.392	0.442	0.968
12	0.006	0.006	0.002	12	0.363	0.414	0.736	12	0.397	0.357	0.787
14	0.005	0.006	0.002	14	0.338	0.423	0.767	14	0.377	0.363	0.801
16	0.006	0.006	0.002	16	0.289	0.438	0.761	16	0.351	0.370	0.769
18	0.006	0.006	0.002	18	0.301	0.446	0.736	18	0.346	0.382	0.762
20	0.006	0.007	0.002	20	0.229	0.391	0.711	20	0.326	0.376	0.761
22	0.005	0.007	0.002	22	0.236	0.388	0.686	22	0.329	0.368	0.706
24	0.005	0.007	0.002	24	0.217	0.343	0.720	24	0.323	0.367	0.728
26	0.005	0.007	0.002	26	0.230	0.343	0.596	26	0.325	0.361	0.707
28	0.005	0.007	0.002	28	0.244	0.334	0.635	28	0.320	0.335	0.705
30	0.005	0.007	0.002	30	0.264	0.360	0.640	30	0.319	0.337	0.691
32	0.005	0.007	0.002	32	0.244	0.397	0.623	32	0.319	0.334	0.682
34	0.005	0.007	0.002	34	0.287	0.258	0.632	34	0.331	0.316	0.717
36	0.005	0.007	0.002	36	0.282	0.308	0.722	36	0.328	0.318	0.704
38	0.005	0.007	0.002	38	0.301	0.238	0.322	38	0.328	0.322	0.727
40	0.005	0.007	0.002	40	\	\	\	40	0.328	0.319	0.721

Tabella A.IV-8 - GeoEye-1: residui orientamento SISAR, modello rigoroso, operatore 2

RMSE GCPs				RMSE CPs				RMSE CPs (fix)			
n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]
6	0.05	0.12	0.93	6	0.24	0.27	0.56	6	0.27	0.31	0.72
8	0.117	0.147	0.865	8	0.238	0.282	0.561	8	0.264	0.317	0.707
10	0.105	0.157	0.827	10	0.244	0.302	0.537	10	0.265	0.329	0.682
12	0.107	0.207	0.757	12	0.245	0.251	0.548	12	0.260	0.275	0.677
14	0.181	0.196	0.718	14	0.212	0.254	0.544	14	0.253	0.271	0.669
16	0.219	0.188	0.776	16	0.162	0.268	0.464	16	0.252	0.277	0.660
18	0.207	0.192	0.738	18	0.169	0.252	0.460	18	0.252	0.252	0.656
20	0.207	0.196	0.701	20	0.164	0.244	0.478	20	0.247	0.247	0.654
22	0.198	0.191	0.670	22	0.172	0.250	0.500	22	0.247	0.239	0.656
24	0.201	0.203	0.648	24	0.156	0.240	0.523	24	0.249	0.238	0.653
26	0.201	0.195	0.653	26	0.148	0.256	0.462	26	0.247	0.237	0.634
28	0.197	0.197	0.635	28	0.147	0.251	0.477	28	0.248	0.222	0.631
30	0.194	0.191	0.629	30	0.151	0.272	0.481	30	0.250	0.221	0.643
32	0.188	0.186	0.632	32	0.167	0.302	0.406	32	0.249	0.219	0.640
34	0.183	0.209	0.616	34	0.190	0.241	0.447	34	0.248	0.210	0.645
36	0.180	0.204	0.612	36	0.216	0.291	0.372	36	0.249	0.208	0.642
38	0.183	0.215	0.602	38	0.207	0.164	0.337	38	0.251	0.213	0.636
40	0.184	0.213	0.591	40	\	\	\	40	0.250	0.211	0.632

Tabella A.IV-9 - GeoEye-1: residui orientamento SISAR, RFM, distribuzione 1

RMSE GCPs				RMSE CPs				RMSE CPs (fix)			
n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]	n°GCP	E[m]	N[m]	Up[m]
6	0.06	0.12	0.90	6	0.22	0.27	0.57	6	0.25	0.31	0.71
8	0.188	0.120	0.889	8	0.187	0.276	0.678	8	0.259	0.306	0.754
10	0.185	0.170	0.802	10	0.200	0.265	0.688	10	0.271	0.294	0.746
12	0.184	0.253	0.748	12	0.189	0.225	0.648	12	0.256	0.232	0.703
14	0.181	0.256	0.721	14	0.186	0.212	0.593	14	0.251	0.228	0.681
16	0.196	0.245	0.693	16	0.179	0.215	0.570	16	0.246	0.233	0.668
18	0.192	0.243	0.656	18	0.186	0.211	0.584	18	0.244	0.222	0.661
20	0.183	0.234	0.631	20	0.193	0.218	0.588	20	0.244	0.216	0.658
22	0.176	0.251	0.629	22	0.200	0.161	0.556	22	0.245	0.216	0.637
24	0.176	0.242	0.613	24	0.198	0.168	0.585	24	0.246	0.213	0.640
26	0.174	0.234	0.605	26	0.202	0.169	0.613	26	0.248	0.211	0.653
28	0.180	0.245	0.606	28	0.192	0.111	0.583	28	0.251	0.220	0.645
30	0.180	0.242	0.611	30	0.197	0.080	0.554	30	0.252	0.211	0.658
32	0.175	0.234	0.613	32	0.216	0.089	0.507	32	0.251	0.211	0.651
34	0.170	0.228	0.596	34	0.250	0.094	0.582	34	0.251	0.209	0.651
36	0.174	0.223	0.617	36	0.254	0.065	0.282	36	0.249	0.211	0.636
38	0.173	0.218	0.601	38	0.321	0.089	0.359	38	0.250	0.211	0.635
40	0.184	0.213	0.591	40	\	\	\	40	0.250	0.211	0.632

Tabella A.IV-10 - GeoEye-1: residui orientamento SISAR, RFM, distribuzione 2